

ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI

18

2007

ESTRATTO

All’Insegna del Giglio

INDICE

M. VALENTI, <i>Riccardo Francovich (1946-2007)</i>	7
F. GHEDINI, F. RINALDI, P. KIRSCHNER, M. TOGNON, <i>TESS. La banca dati on-line dei rivestimenti a mosaico</i>	13
M. ANNIBALETTO, <i>Vasa Rubra: un catalogo informatizzato per le terre sigillate di Iulia Concordia</i>	45
F. PARENTI, <i>Pre-Biblio, bibliografia georeferenziata della Preistoria e della Protostoria italiana: struttura del progetto e primi risultati</i>	57
G. BIGLIARDI, <i>Il sistema informativo territoriale archeologico della città di Parma</i>	75
K.A. NIKNAMI, <i>A stochastic model to simulate and predict archaeological landscape taphonomy: monitoring cultural landscape values based on an Iranian survey project</i>	101
P. FÁBREGA ÁLVAREZ, C. PARCERO OUBIÑA, <i>Proposals for an archaeological analysis of pathways and movement</i>	121
A. ANGELINI, F. COLOSI, R. GABRIELLI, E. FENTRESS, C. FILIPPONE, <i>Tecniche speditive per la ricostruzione tridimensionale dell'area archeologica di Villa Magna</i>	141
M. CAVALIERI, in collaborazione con M. BOTTACCHI, F. MANTOVANI, G. RICCIARDI, <i>Misure di resistività mediante OhmMapper finalizzate allo studio del sito di Torraccia di Chiusi</i>	159
R. LASAPONARA, N. MASINI, G. SCARDOZZI, <i>Immagini satellitari ad alta risoluzione e ricerca archeologica: applicazioni e casi di studio con riprese pancromatiche e multispettrali di QuickBird</i>	187
J.A. ESQUIVEL, I. ALEMÁN, F.J. ESQUIVEL, <i>Geometrical 3D laser scanner model of a Chalcolithic vessel (Gor, Granada, Spain)</i>	229
G. SEMERARO, <i>LandLab Project and archaeology on-line. Web-based systems for the study of settlement patterns and excavation data in classical archaeology</i>	243
G. BAGNASCO, P. MUSSIO, M. GEROLI, C. RIDI, S. VALTOLINA, <i>Il Sistema T.Arc.H.N.A. Per una nuova accessibilità al patrimonio culturale</i>	255
G. CAMPEOL, C. PIZZINATO, <i>Metodologia per la valutazione dell'impatto archeologico</i>	273
E.J. SHEPHERD, E. BENES, <i>Enterprise Application Integration (EAI) e Beni Culturali: un'esperienza di gestione informatizzata assistita dalla radiofrequenza (RFId)</i>	293
PROGETTO FIRB 2001: IL MEDITERRANEO ANTICO E MEDIEVALE COME LUOGO DI INCONTRO TRA ORIENTE E OCCIDENTE, NORD E SUD (Atti della Giornata di studio sul tema “GIS e applicazioni informatiche alle ricerche archeologiche e storiche” (Roma, CNR, 5 luglio 2007), a cura di G. SCARDOZZI	
F. D'ANDRIA, <i>Il Mediterraneo antico e medievale come luogo di incontro tra Oriente e Occidente, Nord e Sud</i>	307

G. SEMERARO, B. PECERE, <i>Gestione informatizzata dei dati archeologici e dei sistemi GIS. Applicazione al sito di Hierapolis di Frigia</i>	313
G. SCARDOZZI, <i>Hierapolis di Frigia. Applicazioni informatiche alle riconoscimenti archeologiche e telerilevamento da satellite: l'esempio degli acquedotti della città</i>	331
F. RONCALLI, P. MOSCATI, N. SCALA, <i>Dinamiche di scambio nel Mediterraneo antico: il caso di Cerveteri</i>	353
F. FONTANELLA, D. MERLITTI, <i>Il sito web Impero romano e intellettuali greci</i>	373
D. NONNIS, <i>Prospettive mediterranee dell'economia romana. L'apporto di una banca dati</i>	383
<i>Recensioni:</i>	
A. FIGUEIREDO, G. VELHO (eds.), <i>The World is in Your Eyes. Proceedings of the XXXIII Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Conference (Tomar 2005)</i> , Tomar 2007, CAAPortugal (C. Barchesi), p. 405; A. CORALINI, D. SCAGLIARINI CORLÀITA, <i>Ut natura ars. Virtual Reality e archeologia. Atti della Giornata di Studi (Bologna 2002)</i> , Imola 2007, University Press Bologna (A. Caravale), p. 411.	

IMMAGINI SATELLITARI AD ALTA RISOLUZIONE E RICERCA ARCHEOLOGICA: APPLICAZIONI E CASI DI STUDIO CON RIPRESE PANCROMATICHE E MULTISPETTRALI DI QUICKBIRD

1. INTRODUZIONE

Risulta sempre crescente la necessità di operare per mettere in atto metodologie di ricerca e strumenti finalizzati, da un lato, ad un reale accrescimento della conoscenza del patrimonio archeologico e monumentale, dall'altro, alla sua tutela. Si tratta di una necessità di primaria importanza sia per realizzare studi volti alla ricostruzione storico-archeologica sia, soprattutto, per attivare adeguate politiche di controllo, di monitoraggio e di gestione, fondamentali per la conservazione e la valorizzazione del patrimonio culturale e per favorire la sua fruizione da parte della comunità.

Negli ultimi anni l'attività di alcuni ricercatori dell'Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali (IBAM) del Consiglio Nazionale delle Ricerche, in collaborazione con l'Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale (IMAA) dello stesso Ente, è stata rivolta allo sviluppo di metodologie d'indagine e strumenti di ricerca indirizzati a fornire un contributo in questa direzione. Tra le iniziative intraprese sono oggetto di questo articolo le applicazioni legate all'uso archeologico di immagini ad alta risoluzione riprese dal satellite QuickBird, finalizzate appunto alla conoscenza ed alla valorizzazione del patrimonio archeologico e monumentale; si tratta di diversi tipi di utilizzo, nati sia da esigenze pratiche legate alla ricerca sul terreno svolta in situazioni particolari, sia dalla volontà di testare le potenzialità delle riprese satellitari, pancromatiche e multispettrali, quali strumenti per l'individuazione, l'analisi, la documentazione ed il monitoraggio di siti ed aree di interesse archeologico. QuickBird è il satellite commerciale che trasmette immagini alla più alta risoluzione geometrica, dipendente dall'angolo di acquisizione e compresa tra 0,61 e 0,72 m nella modalità pancromatica e tra 2,44 e 2,88 m nella modalità multispettrale¹; questo tipo di riprese presenta caratteristiche tali che possono

¹ La piattaforma, di proprietà della società americana DigitalGlobe™, è stata lanciata il 18 ottobre 2001 ed è in fase operativa dalla primavera del 2002, su un'orbita polare eliosincrona posta a circa 450 km dalla Terra, con 97,2 gradi di inclinazione e con una velocità al suolo di 7,1 km/secondo. Nel pancromatico la radiazione misurata è costituita da un'unica banda dello spettro elettromagnetico corrispondente al visibile ed al vicino infrarosso (450-900 nm), mentre nel multispettrale è suddivisa in quattro bande (bande 1, 2, 3, 4: blu, verde, rosso e vicino infrarosso) con i seguenti intervalli spettrali: da 450 a 520 nm, da 520 a 600 nm, da 630 a 690 nm e da 760 a 890 nm. I dati vengono acquisiti con una risoluzione radiometrica di 11 bit per pixel, corrispondenti ad un massimo di 2¹¹, cioè 2048 valori per banda di acquisizione. Per un dettaglio delle caratteristiche del satellite e delle immagini da esso riprese, si rimanda a <http://www.digitalglobe.com/>.

ormai essere affiancate alle fotografie aeree a media scala come fonte di dati utili per la ricerca archeologica².

I casi di studio affrontati, in parte ancora in corso, sono esemplificativi dei diversi tipi di utilizzo di queste immagini satellitari e sono costituiti da due filoni principali di applicazioni caratterizzate da un approccio multidisciplinare. Da un lato, le riprese telerilevate sono state utilizzate per gli scopi propri dell'aerotopografia archeologica in casi di mancata disponibilità di riprese aeree (individuazione ed interpretazione di tracce ed anomalie visibili in superficie e determinate da resti archeologici sepolti o semiaffioranti e dalla presenza di elementi paleo-ambientali) e per le finalità della ricognizione archeologica sul terreno sia in contesti urbani che territoriali in assenza di adeguati supporti cartografici (riscontro a terra delle tracce e delle anomalie, georeferenziazione delle immagini per la produzione di strumenti funzionali al lavoro sul campo ed al posizionamento delle evidenze archeologiche individuate durante le ricognizioni, applicazioni integrate con l'uso di tecnologie GPS, etc.), nonché per "renderizzare" i risultati delle ricerche su modelli tridimensionali "vestiti" con le riprese satellitari e per visualizzare e documentare a visitatori virtuali aree archeologiche fisicamente non accessibili.

Dall'altro lato, sono state sviluppate metodologie di *image processing* finalizzate a migliorare l'identificazione delle tracce e delle anomalie archeologiche attraverso l'enfatizzazione della risposta spettrale delle immagini satellitari. Ciò si è ottenuto mediante l'analisi delle proprietà spettrali del sensore in rapporto alle caratteristiche pedologiche, geologiche e di copertura vegetale, attraverso l'analisi delle performance dei vari canali spettrali in rapporto al tipo di anomalia, mediante il confronto prestazionale tra fotografie aeree ed immagini satellitari pancromatiche per la caratterizzazione spaziale delle anomalie individuate e lo sviluppo di procedure basate sull'impiego di algoritmi di *data fusion* e di *edge detection* in rapporto alle diverse caratteristiche della superficie; sono state inoltre sviluppate tecniche di valutazione quantitativa delle metodologie e degli algoritmi impiegati.

R.L., N.M., G.S.

² Se in passato le riprese da satellite potevano essere utilizzate solo per lo studio di elementi paleo-idrografici o di grandi sistemi antichi di organizzazione del territorio, spesso analizzati a scala regionale, oggi lo sviluppo di sensori sempre più precisi e sensibili e la disponibilità di riprese acquistabili anche a prezzi accessibili consentono un numero maggiore di applicazioni in campo archeologico, con la possibilità di arrivare ad indagare singoli monumenti o evidenze. Per una storia dell'uso delle immagini satellitari nella ricerca archeologica cfr. CAMPANA 2004, 279-283; per un quadro piuttosto ampio delle più recenti esperienze legate al *remote sensing* archeologico cfr. FORTE, CAMPANA 2006.

2. LE IMMAGINI SATELLITARI AD ALTA RISOLUZIONE COME STRUMENTO PER LE RICERCHE ARCHEOLOGICO-TOPOGRAFICHE IN CONTESTI URBANI E TERRITORIALI

Un importante contributo all'accrescimento della conoscenza del patrimonio archeologico e monumentale è offerto dalla ricerca topografica volta allo studio di singoli abitati e complessi archeologico-monumentali o effettuata su ambiti territoriali a diversa scala e finalizzata all'individuazione di nuove evidenze archeologiche, alla ricostruzione del popolamento antico di un determinato contesto ed all'analisi del suo sviluppo storico. Le carte archeologiche che ne derivano, sempre più spesso in formato numerico ed inserite in Sistemi Informativi Territoriali, oltre ad essere funzionali alla ricerca storico-archeologica, costituiscono strumenti fondamentali per gli Enti Pubblici preposti alla tutela, alla gestione, alla valorizzazione ed a rendere fruibile il patrimonio culturale all'interno di corrette politiche di pianificazione territoriale, in cui la conservazione delle memorie storiche, archeologiche, monumentali ed ambientali si integri con le esigenze dello sviluppo (GUAITOLI 2001, 2003).

In questo tipo di ricerche, accanto ai tradizionali ed irrinunciabili metodi della riconoscenza sistematica e diretta dei contesti di studio, insieme allo spoglio delle fonti bibliografiche e dei documenti d'archivio, all'esame delle cartografie storiche ed alla lettura ed interpretazione delle fotografie aeree sia storiche che recenti, sta prendendo sempre più piede l'utilizzo delle riprese satellitari, soprattutto grazie alla disponibilità sul mercato di immagini con alte risoluzioni spaziali, spettrali, radiometriche e temporali, che vanno a costituire uno strumento complementare ma non alternativo alle foto aeree stesse. Le immagini riprese dai satelliti si rivelano poi particolarmente preziose nei casi in cui vengono a mancare alcune delle fonti tradizionali della ricerca topografica o alcuni degli strumenti utilizzati nelle indagini.

Tali sono proprio le problematiche emerse nel corso delle ricerche archeologico-topografiche condotte da chi scrive a partire dal 2003 nell'area urbana e nel territorio di Hierapolis di Frigia (Denizli, Turchia sud-occidentale), nell'ambito della Missione Archeologica Italiana, dove si disponeva di scarse riprese aeree e di cartografie poco aggiornate ed a scala non adeguata³. Le ricerche, ancora in corso, finalizzate alla ricostruzione del popolamento antico e delle dinamiche insediative in un'ottica diacronica, vedono quindi affiancato ai metodi tradizionali delle indagini topografiche l'uso delle immagini telerilevate da satellite (Fig. 1), che in primo luogo va ad integrare l'apporto della fotografia

³ Le ricerche sono realizzate in collaborazione con il Laboratorio di Topografia Antica del Dipartimento di Beni Culturali dell'Università del Salento, diretto dal Prof. M. Guaitoli, e con il Laboratorio di Informatica per l'Archeologia dello stesso Ateneo, diretto dal Prof. F. D'Andria, che è anche direttore della Missione Archeologica Italiana a Hierapolis e dell'IBAM-CNR, che ringrazio per il costante sostegno, l'interesse e l'incoraggiamento nelle ricerche. Sulle indagini archeologico-topografiche a Hierapolis cfr. SCARDOZZI 2004, 2006, 2007a, 2007b. Una presentazione preliminare dei risultati è contenuta in SCARDOZZI c.s.a.



Fig. 1 – Immagine satellitare pancromatica del 2005 in cui compaiono l'area urbana e le necropoli di Hierapolis di Frigia: 1, Necropoli Nord; 2, Terme-Chiesa; 3, Porta di Frontino Nord; 4, *Plateia* (Via di Frontino); 5, Agora Nord; 6, Porta Bizantina Nord; 7, Teatro Nord; 8, Necropoli Nord-Est; 9, *Martyrion* di S. Filippo; 10, Terme Flavie (c.d. Grande Edificio); 11, Cattedrale; 12, Fortezza Selgiuchide; 13, Terme Centrali; 14, Agora Civile; 15, Santuario di Apollo; 16, Insula 104 (abitazioni di età imperiale e bizantina); 17, Teatro; 18, Chiesa sopra il Teatro; 19, *Castellum Aquae*; 20, Chiesa a pilastri; 21, Ginnasio; 22, Porta Bizantina Sud; 23, Necropoli Est; 24, Necropoli Sud-Est; 25, Porta di Frontino Sud; 26, Necropoli Sud-Ovest. Le frecce indicano la cinta muraria proto-bizantina. Nel riquadro in alto a destra compare la Turchia sud-occidentale.

aerea; questo tipo di documentazione risultava infatti difficilmente reperibile in loco, essendo disponibili solo riprese oblique effettuate dall'elicottero o dal pallone frenato e mancando completamente riprese verticali⁴.

La scelta è ricaduta sulle immagini del satellite QuickBird, sia già disponibili nell'archivio della società DigitalGlobe™, che appositamente commissionate⁵; esse sono caratterizzate dalla maggiore risoluzione geometrica disponibile per uso civile, che le rende simili come definizione a fotografie aeree planimetriche a media scala⁶. Proprio l'ottima risoluzione spaziale è un requisito fondamentale per il pieno utilizzo delle riprese telerilevate in ambito archeologico; infatti, se quelle a media risoluzione possono aiutare nella contestualizzazione di insediamenti o complessi archeologici, nello studio di grandi sistemi di organizzazione del territorio (come divisioni agrarie o viaibilità antica) e nella comprensione e ricostruzione dei paesaggi antichi, con la possibilità di individuare elementi paleo-idrografici o paleo-ambientali in genere, solo quelle ad alta risoluzione al suolo portano un fattivo contributo alla scoperta di nuovi siti o manufatti archeologici. Importante è poi la possibilità, garantita da queste riprese, di avere una documentazione sinottica di ampie porzioni territoriali e di elevata qualità. A fianco della scarsa documentazione aerorilevata, le immagini satellitari sono state pertanto analizzate sia per l'individuazione delle emergenze archeologiche, sia per il contributo offerto nella caratterizzazione del contesto ambientale in cui tali presenze si collocano;

⁴ Le fotografie aeree, inoltre, sono limitate all'area urbana (indagata nel 2003-2005) e mancano completamente per il territorio che anticamente dipendeva dalla città, dove l'indagine si è estesa nel 2005-2007 (cfr. *infra*).

⁵ Inizialmente è stata utilizzata un'immagine del 30 aprile 2002, mentre nel gennaio del 2005 è stata commissionata una nuova ripresa effettuata il 25 marzo dello stesso anno. Si tratta di immagini di tipo pancromatico, caratterizzate da un'alta risoluzione geometrica (nella prima la dimensione del pixel al suolo è, nel livello *Basic*, di 64 cm, dovuta ad un angolo di ripresa *off-nadir* di 11 gradi, mentre nella seconda è di 62 cm, grazie ad un angolo di acquisizione distante dal *nadir* solo 5 gradi) e coprenti ampie porzioni del territorio di Hierapolis (rispettivamente 142 e 160 km²), in parte sovrapposte, con la città che compare in entrambe le riprese; dell'immagine del 2005 è stata acquistata anche una porzione minima (25 km²) dell'acquisizione in modalità multispettrale relativa all'area urbana, alle necropoli ed all'immediato suburbio, ripresa contemporaneamente a quella pancromatica (risoluzione spaziale nel livello *Basic*: 2,46 m). Gli acquisti di queste immagini e delle altre relative al territorio di Hierapolis sono stati effettuati tramite la società Telespazio. Tutti i prodotti acquistati sono di livello *Standard Ortho-ready*, in formato GeoTIFF (tipo di compressione del formato Bitmap che associa alle informazioni normalmente contenute in un file TIFF anche le coordinate di riferimento terrestre dell'immagine), con il pixel ricampionato in modo da ottenere una risoluzione geometrica al suolo pari a 0,60 m in modalità pancromatica e 2,40 m in modalità multispettrale (il ricampionamento del pixel è ottenuto mediante il metodo di interpolazione *nearest neighbour*).

⁶ Per un confronto tra immagini satellitari di QuickBird e fotografie aeree, cfr. *QuickBird - Aerial Photography Comparison Report* in <http://www.digitalglobe.com/>. Per altri recenti casi di utilizzo di immagini di QuickBird nelle ricerche archeologiche cfr.: CAMPANA 2002, 2004; CAMPANA, FRANCOVICH 2003, 2005; LÖNNQVIST, TÖRMÄ 2003, 2004; GEORGOUΛΑ *et al.* 2004; LASAPONARA, MASINI 2005; MUSSON, PALMER, CAMPANA 2005, 247-248; BITELLI *et al.* 2006; CAMPANA *et al.* 2006; COLOSI *et al.* 2006; DEROIN *et al.* 2006; INVERNIZZI *et al.* 2006; LASAPONARA, MASINI 2006a-d; MASINI, LASAPONARA 2006a-b, 2007. Cfr. anche FAINTICH 2004; STARK 2005.

hanno così costituito uno strumento fondamentale a supporto delle ricerche effettuate sul terreno, fornendo una grande quantità di dati e di indicazioni per le attività di scavo e di cognizione archeologica⁷.

Per quanto riguarda l'area urbana e l'immediato suburbio, le immagini, da un lato, hanno garantito per la prima volta una visione planimetrica complessiva della città, di cui in precedenza erano disponibili solo vedute prospettiche a bassa quota, dall'altro, hanno anche permesso analisi di dettaglio su singoli settori o complessi monumentali. Il primo utilizzo di queste riprese è stato finalizzato alla scoperta di nuove evidenze archeologiche e monumentali, attraverso la lettura e l'interpretazione delle tracce e delle anomalie visibili in superficie e riferibili ad elementi archeologici sepolti o semiaffioranti; l'interpretazione delle immagini satellitari ha preceduto ed accompagnato le attività di ricerca sul terreno sia in area urbana che nel territorio di Hierapolis, durante le quali si è proceduto alla costante verifica al suolo delle tracce e delle anomalie riscontrate sulle riprese, così da precisarne la reale pertinenza ad elementi archeologici (distinguendo quelle di diversa origine), l'interpretazione (evitando equivoci ed errori) e, ove possibile, anche la cronologia. La verifica delle tracce è stata anche possibile, almeno per l'area urbana, dal confronto con le riprese aeree oblique, che si sono mostrate molto efficaci nella documentazione delle aree archeologiche, rendendo meglio comprensibili situazioni topografiche e complessi monumentali.

L'analisi delle immagini di QuickBird è stata pertanto avviata in integrazione e, in gran parte, in sostituzione di quella delle riprese aeree, con la quale presenta molti punti in comune. Al pari di quanto normalmente avviene per le aerofotografie (PICCARRETA, CERAUDO 2000, 99-128; CERAUDO 2003, 81-83; MUS-SON, PALMER, CAMPANA 2005, 40-47, con bibliografia precedente), infatti, si ha la possibilità di cogliere nelle riprese satellitari le tracce di elementi archeologici non visibili o perlomeno difficilmente rintracciabili nell'indagine sul terreno; inoltre, nel caso di oggetti o complessi archeologici in vista, l'immagine, date le sue caratteristiche di veduta d'insieme, può essere sfruttata vantaggiosamente a fini di documentazione e di contestualizzazione, integrando i dati ambientali, geomorfologici, archeologici e paesaggistici. Tutte le tipologie di tracce archeologiche sono visibili nelle riprese telerilevate da satellite: in particolare, quelle da umidità (*damp-marks*), da vegetazione (*grass-weed-crop-marks*), da alterazione nella composizione del suolo (*soil sites*), da sopravvivenza e le

⁷ In precedenza, l'utilizzo di immagini satellitari di Hierapolis è stato limitato a studi sulle caratteristiche geologiche e geofisiche del sito e del territorio circostante, svolte tra il 2001 ed il 2003 (CARROZZO *et al.* 2002; LEUCCI, NEGRI, RICCHETTI 2002; RICCHETTI 2004): sono state prese in esame quattro immagini pancromatiche Spot del 1997-1999 (risoluzione geometrica 10 m), le immagini QuickBird del 2002 (pancromatico e multispettrale livello *Standard 2A* con risoluzioni di m 0,70 e 2,80) ed immagini Ikonos del 24 aprile 2004 (pancromatico e multispettrale con risoluzioni tra 1 e 4 m); sono stati realizzati anche DTM estraendo i dati da stereocoppie acquisite dai satelliti Spot ed Ikonos. Minime sono state le applicazioni alla ricerca archeologica, limitate alla registrazione di tracce all'interno dell'area urbana e subito a nord della città.

anomalie logiche riscontrabili talvolta nell'osservazione di un paesaggio.

Tra gli elementi di mediazione che permettono la visibilità delle tracce archeologiche, quello che meno si evidenzia nell'esame delle riprese satellitari utilizzate è senza dubbio il microrilievo (*shadow sites*), vista l'impossibilità della lettura stereoscopica che esalta anche le minime variazioni altimetriche⁸; nel caso specifico, però, le immagini sono state tutte riprese con il sole basso all'orizzonte – tra le 8:47 (quella del 2002) e le 9:00 (quella del 2005) – cosicché molti dislivelli risultano comunque evidenziati dalle ombre lunghe. Si è inoltre cercato di ovviare a questa difficoltà elaborando in via sperimentale degli anaglifi, con un artificio ottico che consente in modo rapido e speditivo una percezione della terza dimensione senza realizzare una vera stereoscopia⁹. Gli anaglifi risultano utili nella fase di lettura e di interpretazione delle immagini satellitari che precede ed accompagna l'esplorazione diretta del terreno, per percepire immediatamente la morfologia del territorio ed il suo andamento orografico. Non va però trascurata l'importanza che gli anaglifi possono avere anche per la divulgazione e la diffusione dei risultati delle ricerche presso un pubblico non abituato alla lettura di immagini planimetriche dall'alto.

Nella campagna del 2003, la lettura e l'interpretazione delle riprese di QuickBird hanno fornito un fondamentale contributo alle riconoscizioni condotte all'interno della città di Hierapolis, offrendo dati eccezionali per la ricostruzione dell'impianto urbano ed indirizzando anche le attività di scavo (su Hierapolis, cfr. D'ANDRIA 2003; D'ANDRIA, CAGGIA 2007). Hanno consentito, tra l'altro, la scoperta di un'importante strada processionale che caratterizzava la Hierapolis di età proto-bizantina e che dal centro dell'area urbana conduceva al *Martyrion* di S. Filippo, costruito agli inizi del V sec. d.C. e situato subito al di fuori della cinta muraria realizzata nello stesso periodo. Infatti, nella parte

⁸ QuickBird ha capacità stereoscopiche *in track*, cioè è in grado di acquisire coppie stereo lungo la stessa orbita (con visione nadirale ed obliqua sulla medesima traccia, con ritardo di ripresa tra le due immagini di pochissimi secondi), ma tale caratteristica non viene ancora sfruttata dal punto di vista commerciale.

⁹ Di GIACOMO, SCARDOZZI 2007; gli anaglifi sono stati realizzati facendo seguito a sperimentazioni condotte nell'ambito della Cattedra di Aerotopografia Archeologica del Dipartimento di Beni Culturali dell'Università del Salento, che sta sviluppando lo stesso tipo di applicazioni sulle fotografie aeree (Di GIACOMO 2007). Le riprese satellitari dell'area di interesse vengono filtrate secondo il modello colore RGB, ottenendo come output tre immagini polarizzate a dominante cromatica rossa, verde e blu; l'immagine rossa viene montata nella parte sinistra dell'anaglifo, mentre la verde e la blu sono rimiscolate tra loro in modo da ottenere un'immagine polarizzata al ciano che viene montata sulla parte destra. Osservando l'anaglifo con gli occhiali a lenti polarizzate, mediante la lente rossa montata sull'occhio sinistro e quella ciano sul destro si vincolerà ogni occhio a percepire la sua parte di immagine, indipendentemente dall'altro. Per ottenere una visione tridimensionale reale e misurabile è necessario disporre di una coppia stereoscopica che presenti due punti di vista differenti dello stesso oggetto. Questi anaglifi sono invece ottenuti duplicando la stessa immagine; la percezione dei volumi è legata quindi all'esperienza che si ha, a livello cerebrale, di interpretare sempre come diverse le due immagini provenienti da ciascuno degli occhi. Inoltre, essendo l'immagine di partenza ad alta risoluzione, anche l'anaglifo creato conserva l'alta risoluzione e non si è riscontrata alcuna apprezzabile perdita di dati.



Fig. 2 – Immagine satellitare pancromatica del 2002 in cui è visibile la parte nord-orientale di Hierapolis: A, tratto scavato della *plateia*; B, traccia dello *stenopos* 13; C, traccia del raccordo tra lo *steno* 13 e la Porta di S. Filippo, aperta nelle mura proto-bizantine; D, traccia dello *steno* 15; E, traccia della deviazione dello *steno* 15; F, *Martyrion* di S. Filippo.

nord-orientale della città sono risultate molto evidenti, nella visione dall'alto (integrata anche dalle fotografie aeree oblique), le tracce della maglia ortogonale del tessuto viario, generalmente costituite da accumuli di pietre posti sui lastricati stradali antichi o da creste murarie semiaffioranti che delimitavano i margini delle vie; nell'ambito di questo tessuto regolare, difficilmente percepibile sul terreno, si è riscontrata un'anomalia, riferibile ad un tracciato stradale (*steno* 13), che ad un certo punto piegava dal suo andamento rettilineo ed assumeva un orientamento differente da quello dell'impianto, essendo significativamente indirizzato verso il *Martyrion* (Figg. 2-3).

La verifica a terra e lo scavo che ne è conseguito hanno gettato una nuova luce sulla struttura della città in epoca bizantina, poiché prima di queste ricerche il Santuario di S. Filippo, scavato tra il 1957 ed i primi anni Settanta, sorgeva “isolato” su una collina che domina la città da nord-est; infatti, non erano mai state indagate le modalità con cui esso poteva essere raggiunto



Fig. 3 – Immagine satellitare pancromatica del 2005: si notano i lunghi tratti scavati dello *stenopos* 13 (A), dello *stenopos* 15 (B) e del raccordo tra lo *stenopos* 13 e la Porta di S. Filippo (C); sono visibili anche le aree di scavo del Ponte di S. Filippo (D), del c.d. Ottagono Piccolo (E) e della gradinata che sale al *Martyrion*.

dall'ampia *plateia* che correva al centro dell'area urbana¹⁰. Gli scavi hanno evidenziato come dalla *plateia* si poteva raggiungere il luogo del martirio e della tomba di S. Filippo mediante lo *stenopos* 13, che dapprima manteneva

¹⁰ Per queste ricerche cfr. D'ANDRIA 2005a, 150; 2005b, 102-103; 2005-2006, 350-351, 355; 2006a, 231; 2006b, 116-117; 2007, 34-36; SCARDOZZI 2004, 2007a, 2007b. Alcune delle strade risultano anche evidenziate dai crolli delle abitazioni medio- e tardo-bizantine che sono state costruite all'interno delle sedi stradali nelle fasi di destrutturazione dell'impianto urbano (SCARDOZZI 2007b); gli spietramenti sugli antichi assi viari sono stati anche determinati dalla necessità di liberare (probabilmente in epoca ottomana) le aree corrispondenti alle *insulae*, così da ottenere spazi da utilizzare come piccoli orti.

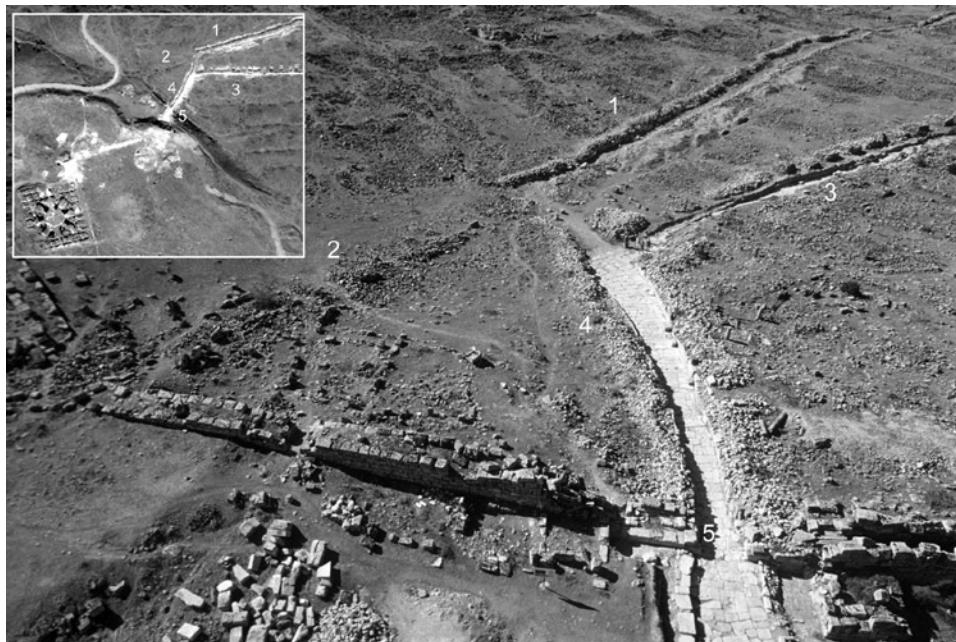


Fig. 4 – Fotografia aerea scattata dal pallone frenato (2005) e, nel riquadro, immagine satellitare pancromatica del 2005: 1, *stenopos* 15; 2, accumulo di pietrame sul tracciato tardo dello *stenopos* 15 diretto verso una breccia delle mura; 3, *stenopos* 13; 4, diramazione dello *stenopos* 13 realizzata in epoca proto-bizantina; 5, Porta di S. Filippo.

quasi completamente lo stesso tracciato di epoca imperiale romana e poi era deviato con un breve raccordo che costituisce una delle pochissime deroghe all'impianto urbano regolare effettuate in età proto-bizantina (Fig. 4); la strada attraversava così la cinta muraria mediante una porta monumentale e proseguiva oltrepassando un corso d'acqua stagionale con un ampio viadotto (Fig. 5). Raggiunte le pendici della collina su cui sorge il *Martyrion*, dove sempre nel 2003 è stato individuato un edificio a pianta ottagonale anch'esso di età proto-bizantina ed ancora in corso di scavo, i pellegrini potevano completare l'ascesa al Santuario di S. Filippo salendo una lunga gradinata.

Un'altra evidente anomalia nel tessuto viario, riscontrata sempre dall'analisi delle immagini satellitari, è stata anch'essa oggetto di un intervento di scavo; si tratta del tracciato dello *stenopos* 15, che in epoca tardo-bizantina, oppure ottomana, è stato fortemente deviato in direzione nord in modo da attraversare la cinta muraria, crollata nel VII sec. d.C. in seguito ad un terremoto, mediante una breccia.

Nel corso del 2004 ed in parte anche nel 2005, la ricerca si è estesa all'esame di tutto l'impianto urbano della città, in precedenza indagato solo con



Fig. 5 – Ripresa aerea dal pallone frenato in cui compaiono la Porta di S. Filippo, i resti della spalla meridionale dell'ampio viadotto esterno alle mura ed una parte della gradinata e del vicino c.d. Ottagono Piccolo; nel riquadro in basso, particolare dell'immagine satellitare del 2005 relativo a quest'area della città, e, nel riquadro in alto, veduta della gradinata e dell'Ottagono Piccolo ai piedi della collina dominata dai resti del *Martyrion* di S. Filippo.

sondaggi mirati, realizzati per lo più tra il 1969 ed il 1971, che avevano messo in luce alcuni tratti di lastricati e numerosi incroci stradali. Anche in questo caso, il contributo offerto dalla lettura e dall'interpretazione delle immagini satellitari è stato notevole, costituendo uno strumento fondamentale per la ricostruzione del tessuto urbano (Fig. 6); è stato così possibile esaminare le caratteristiche dell'impianto, registrarne regolarità ed anomalie dovute alla geomorfologia del territorio, studiarne la conservazione in epoca proto-bizantina e la successiva destrutturazione, oltre che individuare settori dell'abitato (nella parte orientale dell'area urbana) lasciati all'esterno delle già ricordate mura costruite agli inizi del V sec. d.C.¹¹. È stata inoltre esaminata e ricostruita la principale viabilità

¹¹ SCARDOZZI 2007b. All'individuazione delle tracce dell'impianto urbano e delle sue anomalie, non supportata però da alcuna analisi storico-archeologica, si accenna anche in RICCHETTI 2004, dove, in assenza di un puntuale riscontro a terra, le anomalie sono state equivocate come tracce esclusivamente da vegetazione, mentre, come si è visto, molte di esse sono determinate dagli accumuli di pietre o da creste murarie semiaffioranti.



Fig. 6 – Fotografia aerea scattata dal pallone frenato (2003) e, nel riquadro, immagine satellitare pancromatica del 2005: sono visibili lo *stenopos* 15 (1) in corso di scavo (subito dopo l'asportazione del cumulo di pietre soprastante il tracciato), un grande accumulo di pietrame sullo *stenopos* 13 (2) ed i tratti scavati degli *stenopoi* D, E, F (3-5), incrociati ortogonalmente dalle tracce di altri assi stradali.



Fig. 7 – Georeferenziazione dell'immagine satellitare pancromatica del 2005 sulla planimetria di Hierapolis, con vettorializzazione delle tracce e dei resti dell'impianto urbano ed ipotesi ricostruttive: le lettere ed i numeri si riferiscono agli *stenopoi* (elab. G. Di Giacomo).

in uscita dalla città, attraverso le necropoli che la circondano a nord, est e sud. La georeferenziazione delle immagini e la loro gestione nel GIS di Hierapolis, sviluppato ed implementato dal Laboratorio di Informatica per l'Archeologia dell'Università del Salento (SEMERARO, PECERE 2007), unitamente alle misurazioni sul terreno, hanno permesso la vettorializzazione di tutte le tracce ed i resti dell'impianto (Fig. 7), consentendo così di integrare la carta archeologica della città e ricostruirne la maglia urbana piuttosto regolare, costituita da *insulae* a forma di rettangolo stretto e lungo (m 26/27×72/74 circa).

Pochi invece i dati emersi per la parte occidentale dell'area urbana, dove i resti antichi sono in gran parte coperti da uno spesso strato di calcare (alto fino a 3-4 m) che si è andato estendendo su questo settore della città a partire dal Medioevo; da qui l'estesa macchia bianca visibile nelle immagini: infatti, i sensori di QuickBird, proprio a causa della presenza delle formazioni calcaree, hanno subito una sorta di riflessione speculare dell'energia elettromagnetica, che ha consentito di registrare solo scarse informazioni sulla natura della superficie riflettente.

L'analisi e l'interpretazione delle immagini satellitari sono state realizzate utilizzando soprattutto le riprese pancromatiche del 2002 e del 2005, con la possibilità di confrontare anche le due immagini. La seconda, in particolare, presenta nel complesso caratteristiche nettamente migliori, che le derivano da un angolo *off-nadir* inferiore e da una maggiore nitidezza¹²; inoltre, essendo stata ripresa nel mese di marzo, con una vegetazione meno rigogliosa, offre una migliore visibilità delle creste murarie e degli altri resti archeologici semiaffioranti¹³. Accanto all'analisi delle immagini pancromatiche, per tentare di evidenziare meglio le tracce archeologiche sono state effettuate anche elaborazioni della ripresa multispettrale del 2005 (risoluzione al suolo di 2,40 m), quali il *colour composite* RGB delle bande originali (3-2-1, 4-3-2, 4-2-1: Tav. Va), ed operazioni algebriche, come il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (GOMARASCA 2003, 94-100; LASAPONARA, MASINI 2006b; cfr. *infra* § 3.2.2); inoltre è stato combinato il dato pancromatico con il multispettrale e con le sue elaborazioni attraverso algoritmi di *data fusion*, ottenendo nuove immagini *pan-sharpened* con un'alta risoluzione geometrica (70 cm)¹⁴.

¹² Sulla scena acquisita nell'aprile del 2002 si aveva una copertura nuvolosa del 12%, che interessava solo marginalmente il ritaglio acquistato, generando qualche ombra sul terreno ed una leggera foschia; quest'ultima, oltre a rendere meno nitida l'immagine pancromatica, generando un generale appiattimento nei passaggi di tono, rende anche scarsamente utilizzabile la banda del blu nell'immagine multispettrale.

¹³ Il confronto tra le due immagini documenta inoltre i nuovi lavori di scavo effettuati tra il 2002 ed il 2005 e gli interventi logistici, come le nuove strade funzionali alle attività di scavo e di restauro nonché alla regolarizzazione dei flussi turistici.

¹⁴ Tali elaborazioni relative all'area urbana sono state realizzate dal Dott. Giacomo Di Giacomo. Per questi ed altri tipi di elaborazioni delle riprese satellitari cfr. *infra* § 3. Ulteriori elaborazioni sulle immagini di Hierapolis del 2005, per quanto riguarda il territorio immediatamente circostante la città, sono ancora in corso.

Nel complesso, sebbene le riprese pancromatiche fossero di elevata qualità, le elaborazioni delle immagini multispettrali hanno permesso di visualizzare più chiaramente la conformazione del pendio posto subito ad ovest dell'area urbana, caratterizzato dalle bianche formazioni calcaree, ed in qualche caso hanno maggiormente messo in evidenza alcune tracce archeologiche. Considerando poi la differente natura delle informazioni ottenibili nelle varie bande, i canali rosso e vicino infrarosso (VIR) sono risultati i più adatti all'identificazione ed alla definizione di tracce archeologiche; in particolare, la banda del VIR è quella che restituisce al meglio informazioni sui fenomeni di stress della vegetazione determinati da resti antichi sepolti (MUSSON, PALMER, CAMPANA 2005, 242-248; LASAPONARA, MASINI 2007; per l'individuazione a Hierapolis delle tracce da vegetazione cfr. RICCHETTI 2004): per tale motivo le elaborazioni in cui questa banda svolge un ruolo di primo piano sono quelle che hanno maggiormente evidenziato le tracce legate alla crescita disomogenea del manto erboso.

Nel 2005 e nel 2006 le ricognizioni archeologiche di superficie, ancora in corso, sono state estese al territorio della città, per il quale non si dispone di fotografie aeree e soprattutto di un'adeguata cartografia; le migliori carte topografiche dell'area sono infatti costituite da una copertura in scala 1:25.000 (acquisita in formato raster), realizzata nei primi anni '70 ed aggiornata agli anni '90 del Novecento, adatta per una visione d'insieme del territorio, ma scarsamente utilizzabile nell'indagine diretta sul terreno, anche perché nelle cartografie risultano insufficientemente indicate le partizioni agrarie, con la conseguenza, pertanto, di numerosi problemi di orientamento e di posizionamento delle evidenze archeologiche individuate. Rispetto all'area urbana, quindi, dove comunque si dispone di cartografia vettoriale in scala 1:1.000¹⁵, nel territorio le immagini satellitari costituiscono uno strumento ancora più importante a supporto della ricerca finalizzata alla realizzazione della carta archeologica; non solo le riprese telerilevate vanno a costituire una documentazione complementare alle fotografie aree e sono lette ed interpretate sia preliminarmente all'indagine diretta sul terreno sia contemporaneamente alla raccolta dei dati sia, ancora, in fase di elaborazione ed interpretazione degli stessi, ma costituiscono anche uno strumento di base per l'esplorazione diretta del territorio.

Si è proceduto pertanto all'acquisto di ulteriori immagini pancromatiche, arrivando così ad ottenere la copertura di un'ampia porzione della valle del fiume Çürüksu (l'antico Lykos), in cui è compresa tutta la parte del

¹⁵ Si tratta della carta di Hierapolis in corso di elaborazione da parte degli architetti del Politecnico di Torino che operano nell'ambito della Missione Archeologica Italiana (SPANÒ 2002; ASTORI, SPANÒ 2005; SPANÒ 2007); in area urbana è anche disponibile una cartografia raster fornita dalle Autorità turche in scala 1:500 (realizzata nel 1993).

territorio di Hierapolis oggetto di ricognizione sistematica; in quest'area, nel corso delle indagini sono state individuate ed analizzate numerose presenze archeologiche che stanno contribuendo a ricostruire un articolato quadro dello sviluppo storico del territorio dall'età preistorica fino a quella moderna ed in particolare per le fasi di vita di Hierapolis stessa (dall'età ellenistica fino all'epoca selgiuchide). Stanno quindi emergendo, tra l'altro, una fitta presenza di cave che fornivano la città di travertino, marmo bianco, alabastro, onice e breccia rosata, ed una capillare occupazione del territorio con fattorie (a volte con relativa piccola necropoli) che coprono un arco cronologico compreso tra la tarda età ellenistica e l'epoca proto-bizantina¹⁶; sono state ricostruite le principali strade che si diramavano dalla città ed i tracciati degli acquedotti che la rifornivano scendendo dalle montagne poste più ad est; si sono inoltre individuati piccoli santuari presenti nel territorio e villaggi dipendenti da Hierapolis, oltre che insediamenti medievali e post-medievali (Figg. 8-10).

Per le ricerche nel territorio, vista come detto l'assenza di cartografie adeguate, si è quindi deciso di utilizzare le riprese satellitari pancromatiche anche come documentazione di base per la registrazione ed il posizionamento delle presenze archeologiche. Prima di avviare il lavoro sul campo, le immagini sono state mosaicate e georeferenziate sulla cartografia in scala 1:25.000, così da disporre di uno strumento adeguato ad uno studio preliminare del territorio ed alla programmazione delle ricerche; le riprese acquistate, infatti, in formato *Standard Ortho-ready*, erano fornite con un trattamento costituito solo dall'applicazione di correzioni radiometriche e geometriche di sistema, con dimensione del pixel ricampionata a 60 cm e con proiezione e geocodifica nel sistema di proiezione UTM (datum ed ellissoide WGS84)¹⁷. La georeferenziazione con cui è stato fornito il prodotto, quindi, basata unicamente sull'impiego dei dati orbitali post-processati, integrati da un DEM a bassa risoluzione, è stata ulteriormente migliorata mediante l'utilizzo della cartografia in scala 1:25.000; poiché il sistema di proiezione di queste carte è Gauss-Krüger, esse sono state precedentemente a loro volta georeferenziate in una griglia vettoriale costruita sulla base del sistema di proiezione UTM¹⁸. Al momento dell'indagine sul terreno, poi, la georeferenziazione delle immagini è stata resa ulteriormente più precisa con l'aggiunta di punti di controllo

¹⁶ È in corso l'elaborazione dei dati in vista della pubblicazione della Carta Archeologica; una presentazione preliminare delle ricerche è in SCARDOZZI c.s.a.

¹⁷ Nel processamento di sistema delle immagini viene utilizzato un valore medio di altitudine, calcolato tramite media aritmetica dei nodi del GTOPO30 (DEM con passo di 1 km); l'accuratezza di posizionamento dell'immagine è indicata in 23 m (*Circular Error 90%*) al nadir, mentre il *Root Mean Square Error* è indicato in 14 m.

¹⁸ La georeferenziazione (proiezione UTM, fuso 35N; European Datum 1950; ellissoide WGS84) è stata realizzata da Mauro Mazzei, della Direzione Generale CNR, Ufficio II “Sviluppo e applicazione dei Sistemi Informativi Territoriali”.



Fig. 8 – Tratto della strada antica tra Hierapolis e Tripolis (larga 8 m), pavimentata con pietrame compattato e delimitata da due margini a blocchi (A); è indicata la traccia (B) del segmento conservato all'interno di un campo coltivato a seminativo: i resti dell'asse viario non permettono i lavori agricoli determinando la crescita di vegetazione spontanea in corrispondenza delle presenze archeologiche e generando così l'anomalia riscontrabile nell'immagine satellitare.

(*Ground Control Points*) misurati tramite un sistema GPS da navigazione, così da ottenere un errore medio compreso tra 1 e 3 m, dipendente dalle capacità del ricevitore e variabile a seconda delle immagini e della conformazione del terreno, che in certi settori dell'area indagata sale molto rapidamente da quota 300-350 a 1.100-1.200 s.l.m.¹⁹.

Il prodotto ottenuto costituisce pertanto un ottimo strumento di base per il lavoro sul terreno, presentando caratteristiche di precisione che soddisfano appieno le esigenze della ricerca archeologica in un contesto territoriale come quello in oggetto; le immagini così trattate sono poi inserite in un GIS dedicato, in cui costituiscono uno dei layer da utilizzare sia come base per la georeferen-

¹⁹ Il lavoro sul terreno in Turchia si è svolto in due campagne di sei settimane tra la fine di luglio ed i primi di settembre del 2005 e del 2006; la georeferenziazione (proiezione UTM; ellissoide e datum WGS84) è stata realizzata dal Dott. Giacomo Di Giacomo, che insieme alla Dott.ssa Laura Castrignani collabora alle ricognizioni nel territorio di Hierapolis.



Fig. 9 – Tumulo di età ellenistica situato nella pianura sottostante il terrazzo su cui sorge Hierapolis, ca. 1 km ad ovest della città, lungo un antico tracciato diretto nella valle del Lykos: nei riquadri in basso sono visibili lo scavo della camera funeraria operato da clandestini (a sinistra) ed un particolare dell'immagine satellitare del 2005 con l'anomalia prodotta dal cumulo di terra che sovrasta i resti antichi all'interno del campo a seminativo (a destra).



Fig. 10 – Necropoli di età romana pertinente ad un villaggio antico situato presso il moderno abitato di Kuçukdereköy, ca. 3 km a sud-est di Hierapolis; la maggior parte delle sepolture è costituita da tombe a fossa, rivestite da grandi lastroni di travertino: le tracce chiare visibili nell'immagine satellitare sono costituite da scavi clandestini recenti, mentre quelle scure sono riferibili alle fosse scavate in passato e prive del lastrone di copertura.

ziazione delle evidenze sia per la vettorializzazione delle tracce archeologiche (Tav. Vb). Molto più tempo ed una vera e propria campagna topografica di rilievo, non conciliabile (anche economicamente) con le esigenze, i tempi e l'organizzazione della ricerca archeologica nel particolare contesto indagato, avrebbe invece richiesto l'elaborazione di ortofotopiani e spaziocarte²⁰; a questo proposito, va comunque sottolineato che l'utilizzo delle immagini satellitari ad alta risoluzione per la realizzazione di ortofotocarte e soprattutto di vere e proprie cartografie o aggiornamenti cartografici, utilizzabili sia nella ricerca sul terreno sia all'interno dei GIS, costituisce uno dei settori del telerilevamento che può avere maggiori ricadute in archeologia²¹.

Nel corso della ricognizione diretta del territorio si sta anche costruendo e sperimentando un sistema in grado di velocizzare il lavoro di posizionamento e documentazione del rinvenimento archeologico, utilizzando un computer palmare con GPS integrato Garmin iQue M5 ed un software di navigazione archeologica e gestione delle schede di ricognizione "Ulixes", ancora in fase prototipica²². Il sistema consente di navigare su cartografia impostata dall'utente o, come nel caso di Hierapolis, su immagini satellitari ad alta risoluzione²³; in caso di rinvenimento archeologico, si ha la possibilità di memorizzare la sua posizione e di documentarlo dettagliatamente mediante una scheda elaborata appositamente per il software Ulixes²⁴. Le riprese satellitari sono state suddivise

²⁰ Il processamento di ortorettifica dell'immagine satellitare del 2005 relativamente alla sola area urbana di Hierapolis, per la quale si dispone invece di maggiori dati metrici e di un DTM ad alta definizione, è stato realizzato dagli architetti del Politecnico di Torino (A. Spanò, F. Chiabrando) ed utilizzato anche per l'aggiornamento cartografico speditivo della topografia moderna nella carta di Hierapolis. Per analoghe applicazioni da parte dello stesso gruppo di ricerca, cfr. http://www2.polito.it/ricerca/ilidza-bosnia/fase1_2.pdf; <http://www.sifet.it/Convegno2005/abstracts.html> (Progetto pilota per la riqualificazione e la costruzione di un Parco archeologico a Ilidza-Sarajevo, BiH); sull'argomento cfr. anche MAZZEI 2003.

²¹ Satelliti come QuickBird, Ikonos, Spot 5 ed Eros A1 sono in grado di acquisire immagini pancromatiche con alta risoluzione spaziale ed anche stereocopie, che possono essere utilizzate per la produzione di ortofotocarte o cartografie a scala compresa tra 1:25.000 e 1:10.000, forse anche 1:5.000; allo stato attuale, però, le applicazioni fotogrammetriche vere e proprie, ovvero basate sull'utilizzo di coppie stereoscopiche, sono molto poche, vista anche la scarsa disponibilità o la disponibilità a costi molto elevati di tali coppie. Sull'argomento cfr. tra gli altri: CHENG, TOUTIN 2002; CRESPI *et al.* 2003; BAIOCCHI *et al.* 2004; CAPRIOLI, TARANTINO 2005; molti contributi in materia sono per esempio negli atti degli ultimi convegni ASITA (Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali), IEEE/IGARSS (Institute of Electrical and Electronics Engineers/International Geoscience and Remote Sensing Symposium), ed ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing).

²² La sperimentazione è svolta in collaborazione con la Cattedra di Aerotopografia Archeologica dell'Università del Salento (Prof. Giuseppe Ceraudo) e con la SIRTER s.r.l. di Taranto (Dott. Giacomo Di Giacomo e Geom. Gianpaolo Di Giacomo), che sviluppa il software.

²³ Nel caso delle ricognizioni nel territorio di Hierapolis, oltre alle immagini satellitari sono stati caricati nel palmare anche i raster della cartografia in scala 1:25.000, georeferenziati con sistema di proiezione UTM (fuso 35N; datum ed ellisseoide WGS84).

²⁴ Il sistema si occupa di integrare automaticamente il dato archeologico con la posizione acquisita dal GPS. Le informazioni registrate sul terreno vengono poi verificate e rielaborate mediante un software commerciale (Global Mapper) e poi esportate nei formati utilizzati dagli applicativi GIS.

in porzioni di 500 m² (altrimenti sarebbero risultate troppo pesanti per le capacità hardware del computer palmare) ed organizzate in mosaici indicizzati, così che il software possa caricare in tempo reale, in base alla posizione calcolata dal GPS, solo la porzione di immagine del territorio in esame, velocizzando quindi tutte le operazioni (SCARDOZZI, in questo volume).

A partire dal 2006 le ricognizioni archeologiche si sono estese anche al di fuori della porzione del territorio di Hierapolis più vicina alla città, sia sempre nella valle del Lykos (verso sud-ovest, in direzione di Laodicea di Frigia, e verso nord-ovest in direzione di Tripolis al Meandro), sia nell'ampio altopiano posto a nord-est della città; in queste aree molto estese, lo studio, ancora in corso, prevede un'esplorazione a maglie più larghe finalizzata alla ricostruzione delle linee generali del popolamento antico, con un'indagine sul terreno che si intensifica e diviene più sistematica in particolari situazioni o contesti, per esempio, in corrispondenza dell'importante tracciato stradale Laodicea-Hierapolis-Tripolis, ricostruito nella sua interezza (SCARDOZZI c.s.b), oppure nel caso delle aree culturali o dei villaggi antichi individuati. La ricerca in questo territorio è favorita dal fatto che dal marzo 2006 esso è quasi completamente coperto da immagini *pan-sharpened* di QuickBird visibili in Google Earth²⁵; le riprese, sebbene compresse per la visualizzazione attraverso Internet, mantengono comunque un dettaglio molto elevato che consente l'esplorazione del vasto comprensorio preliminare all'indagine sul terreno: le immagini delle aree di interesse sono scaricate (con uno *screen capture* o salvando l'immagine visualizzata), georeferenziate ed utilizzate per il lavoro di ricognizione sul campo e di verifica delle eventuali tracce ed anomalie visibili. Particolarmente utile si è rilevata poi la possibilità di consultare tutte le immagini in vista tridimensionale, grazie al DEM a bassa risoluzione utilizzato da Google Earth, che permette di apprezzare la morfologia del terreno. Per le aree più interessanti all'interno di questo ampio territorio si è proceduto comunque all'acquisto delle riprese satellitari di QuickBird, da impiegare per un'indagine più mirata e sistematica²⁶, poiché le immagini visualizzate in Google Earth non possono sostituire completamente quelle originali, vista la perdita di risoluzione spaziale e soprattutto spettrale dovuta alla compressione; inoltre, nei casi in cui le immagini acquistate non erano presenti in Google Earth si è comunque sfruttato il suo DEM per visualizzarle in 3D.

²⁵ Per l'utilizzo di Google Earth in archeologia cfr. BECK 2006; UR 2006. In Google Earth l'intero pianeta è coperto da immagini a media risoluzione (15 m), che derivano da dati Landsat, ma alcune aree selezionate sono coperte da riprese ad alta risoluzione di QuickBird; questo tipo di copertura è in corso di ampliamento dopo la prima comparsa del software nel 2005 (<http://earth.google.com/>).

²⁶ Le immagini acquistate per il territorio, sempre prodotti *Standard Ortho-ready* con pixel ricampionato a 60 cm, consistono in ritagli delle scene riprese il 17 novembre 2003 (ore 8:38; angolo *off-nadir* di 11 gradi; 66 km²), l'11 luglio 2005 (ore 9:06; angolo *off-nadir* di 8 gradi; 25 km²) ed il 6 luglio 2005 (ore 9:01; angolo *off-nadir* di 21 gradi; 120 km²).

Google Earth permette anche di immettere dati aggiuntivi e, in particolare, nel corso delle ricerche a Hierapolis, il dato fornito on-line dal server è stato integrato con il posizionamento dei rinvenimenti ed i relativi metadati registrati nelle ricognizioni. Anche l'immagine del 2005 (quella ripresa da QuickBird in seguito ad un nostro ordine di acquisizione: cfr. *supra*), relativa all'area urbana ed al territorio immediatamente circostante, è stata inserita nel marzo 2006 come demo in Google Earth ed è quindi stato possibile disporre di una facile visualizzazione sia planimetrica che tridimensionale, ampiamente utilizzabile in fase di renderizzazione e presentazione dei risultati delle ricognizioni archeologiche.

Attraverso altri software per il trattamento dei dati (Global Mapper), inoltre, si possono importare *waypoints* dai GPS Garmin utilizzati nel lavoro sul campo: è così possibile, per esempio, ricostruire rapidamente e visualizzare i percorsi degli acquedotti che portavano acqua potabile a Hierapolis oppure i tracciati delle antiche strade. Sempre per una più efficace presentazione dei risultati delle ricerche, oltre all'utilizzo del DEM a bassa risoluzione di Google Earth, sono stati anche realizzati altri modelli digitali del terreno editati con Global Mapper e basati sui dati GTOPO30 e SRTM90, “vestiti” poi con le immagini satellitari georeferenziate su cui sono state posizionate le evidenze archeologiche di volta in volta prese in considerazione (<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/gtopo30.html>; <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>).

Nelle esperienze fin qui presentate le riprese satellitari sono state quindi utilizzate come uno degli strumenti a supporto della ricerca archeologica, in tutte le sue fasi, dalle indagini sul terreno (scavi o ricognizioni di superficie) alla presentazione dei risultati, e non come strumenti sostitutivi della ricerca stessa, come qualche volta viene quasi suggerito sopravvalutandone le potenzialità; fondamentale, quando possibile, risulta sempre – è bene sottolinearlo ulteriormente – la verifica a terra di quanto visibile nelle immagini, evitando così di incorrere in fraintendimenti o interpretazioni frettolose e superficiali e distinguendo nei casi dubbi le tracce archeologiche (spesso definibili cronologicamente solo con il riscontro a terra) dalle false tracce o da quelle determinate da fattori geologici.

Un ultimo tipo di applicazione, maturato nell'ambito del progetto *Iraq Virtual Museum* del CNR, ancora in corso, vede le immagini telerilevate da satellite ricoprire un ruolo diverso da quanto esposto sopra, proprio per l'impossibilità di una verifica a terra; in questo caso, infatti, le riprese sono state utilizzate per visualizzare e documentare antiche città dell'Iraq (in particolare, Ur, Uruk, Nimrud e Khorsabad), attualmente non accessibili, a “visitatori virtuali” che vedono così contestualizzati nel sito di provenienza gli oggetti conservati nel Museo di Baghdad e sono guidati all'interno dei resti delle aree archeologiche, sia nel loro stato di conservazione attuale che in ricostruzioni virtuali (GABELLONE, SCARDOZZI 2006, 2007). Non è mancata, comunque,

anche in questa esperienza, la possibilità di incrementare, attraverso l'analisi e l'interpretazione delle immagini, la conoscenza dei centri esaminati, non sempre sufficientemente indagati per quanto riguarda la loro articolazione urbanistica; è stato così possibile, pur con le cautele del caso, offrire un contributo alla ricostruzione della loro topografia antica²⁷. Da non trascurare, poi, la possibilità, offerta dal confronto di immagini riprese in momenti diversi, di un monitoraggio dello stato di conservazione delle aree in oggetto, in una situazione particolarmente rischiosa per il patrimonio archeologico dell'Iraq come quella attuale.

G.S.

3. METODOLOGIE DI PROCESSAMENTO DELLE IMMAGINI QUICKBIRD ED APPLICAZIONI ALLA RICERCA ARCHEOLOGICA

Da quanto esposto sopra, è evidente che i dati satellitari ad alta risoluzione possono costituire una fonte di informazione complementare alle fotografie aeree nel campo della ricerca archeologica. Questo è tanto più vero quanto più si riduce il gap della risoluzione spaziale e si massimizzano i vantaggi per quanto concerne la risoluzione spettrale, attraverso una metodologia basata sull'impiego di affidabili algoritmi di processamento delle immagini.

Gli esiti di recenti studi condotti da chi scrive (LASAPONARA, MASINI 2005, 2006a, 2006b) stanno consentendo di mettere a punto una metodologia di analisi di dati satellitari pancromatici e multispettrali ad alta risoluzione per prospettive in campo archeologico. Tale metodologia è finalizzata all'individuazione di anomalie di superficie (*marks*) indotte dalla presenza di manufatti sepolti. L'analisi è essenzialmente basata sull'utilizzo di algoritmi di *data fusion*, *enhancement* ed *edge detection*.

Il *data fusion* consente di sfruttare appieno le caratteristiche dei dati QuickBird combinando insieme l'elevata risoluzione spaziale delle immagini pancromatiche con la risoluzione radiometrica delle immagini spettrali. Ci sono casi in cui le caratteristiche dei suoli non consentono di rilevare con chiarezza le feature di interesse archeologico, per diverse ragioni quali ad esempio l'azione del dilavamento in siti collinari e montuosi, la presenza di una vegetazione rada, i danni causati dall'agricoltura meccanizzata. In queste situazioni è consigliabile l'impiego di algoritmi di *enhancement*. Infine, per enfatizzare ulteriormente contorni e discontinuità riferibili ad anomalie archeologiche, le immagini vengono ulteriormente elaborate mediante algoritmi di *edge detection*.

²⁷ Si possono ricordare, come esempi, l'individuazione ad Ur di tracce di strutture sepolte riferibili ad una pianificazione urbana di età neobabilonese più estesa di quella indagata dagli scavi degli anni Trenta del '900, oppure l'evidenziazione ad Uruk delle tracce di un fitto e stratificato sistema di canalizzazioni antiche poste immediatamente all'esterno della cinta muraria.

Obiettivo di questo contributo è quello di focalizzare l'attenzione sulle potenzialità delle immagini satellitari ad alta risoluzione in rapporto alle caratteristiche dei siti ed al tipo di anomalie e sul contributo che una robusta metodologia di processamento delle immagini può fornire per il riconoscimento di tracce riconducibili a presenze sepolte di interesse archeologico. A tal fine, si farà riferimento ad alcuni casi di studio scelti in quanto rappresentativi di una varietà relativamente a: caratteristiche superficiali e geomorfologiche dei suoli (suolo nudo o vegetato, rilievi collinari o aree pianeggianti), tipo di anomalia (*crop, soil e shadow-marks*); natura dell'evidenza sia essa archeologica (insediamenti medievali e divisioni territoriali) che paleo-ambientale (paleo-alvei e reticolari idrografici sepolti).

3.1 Data fusion

Il *data fusion* consente di “fondere” ed integrare il contenuto informativo associato a due o più sorgenti di dati. In particolare, nel caso di immagini satellitari pancromatiche e multispettrali, gli algoritmi di *data fusion* sono generalmente utilizzati per integrare l’alta risoluzione spaziale dell’immagine acquisita nel pancromatico con le informazioni spettrali acquisite nelle varie bande a più bassa risoluzione spaziale. Le performance ottenute dagli algoritmi di *data fusion* tendono quindi a stimare quanto la nuova immagine ottenuta coincida spettralmente con la banda dell’immagine multispettrale originale e quanto, al contempo, la risoluzione spaziale sia confrontabile con quella dell’immagine pancromatica. La scelta del metodo più appropriato dipende strettamente dal tipo di informazione in ingresso e dal tipo di informazione che si desidera estrarre dall’immagine ottenuta dalla fusione.

In passato sono state proposte diverse metodologie per la fusione di immagini multirisoluzione. Gli algoritmi maggiormente utilizzati per le procedure di *data fusion* sono: la trasformazione di intensità, colore e saturazione (IHS)²⁸, l’approccio moltiplicativo²⁹, la trasformata di Brovey (LASAPONARA, MASINI 2006a), la *Principal Component Analysis* (PCA)³⁰. Tali algoritmi non

²⁸ L’IHS (*Intensity-Hue-Saturation*) è un metodo tradizionalmente adottato come *data fusion*, basato sulla trasformazione delle tre componenti Intensità-Luminosità-Saturazione; i prodotti fusi sono ottenuti dall’anti-trasformata effettuata previa sostituzione della componente Intensità con l’immagine nel pancromatico.

²⁹ L’approccio moltiplicativo realizza l’integrazione aritmetica di due data set ed è basato sui seguenti step: 1) i dati multispettrali sono ricampionati alla stessa risoluzione spaziale del dato pancromatico, 2) la fusione è realizzata mediante la seguente moltiplicazione $DN_{Bi,new} = DN_{Bi} \times DN_{high\ res, Image}^{high\ res, Image}$ in cui DN è il numero digitale, $DN_{Bi,new}$ è il prodotto fuso ottenuto per la banda i -esima, DN_{Bi} indica l’originale banda spettrale, infine $DN_{high\ res, Image}^{high\ res, Image}$ si riferisce all’immagine con la più alta risoluzione che nel caso di QuickBird è dato dal pancromatico.

³⁰ La PCA è impiegata soprattutto come tecnica di *enhancement*, di cui si dirà nel paragrafo 3.2. La PCA applicata come tecnica di *data fusion* consiste nei seguenti step: 1) si effettua una prima trasformazione, 2) si sostituisce una delle componenti principali con l’immagine pancromatica, 3) si effettua l’antitrasformata che restituisce i prodotti fusi.

sempre risultano efficienti quando vengono applicati ad immagini satellitari ad alta risoluzione geometrica. In questi casi, infatti, si possono verificare delle significative distorsioni spettrali³¹.

Studi recenti condotti da ZHANG (2004) hanno consentito di sviluppare un nuovo algoritmo di *data fusion* finalizzato al processamento di immagini pancromatiche e multispettrali ad alta risoluzione spaziale quali, ad esempio, quelle riprese dai satelliti Ikonos e QuickBird. Tale algoritmo utilizza un insieme di parametri statistici per eliminare la correlazione tra le bande stesse, consentendo di ridurre i problemi connessi alla distorsione spettrale. Attualmente l'algoritmo è implementato in una routine del software PCI Geomatica ed applica il metodo dei minimi quadrati per adattare al meglio i valori di radianza delle varie bande.

3.2 Tecniche di enhancement

3.2.1 Principal Component Analysis (PCA)

La PCA consente di minimizzare un problema che tipicamente si riscontra nell'elaborazione dei dati multispettrali: l'elevata correlazione tra le diverse bande che costituisce una causa di ridondanza dell'informazione e quindi rumore, riducendo la capacità di discriminazione tra pixel con valori simili di riflettanza. La PCA, dal punto di vista matematico, consiste in una trasformazione lineare che decorrela dati multivariati attraverso la traslazione e/o rotazione degli assi dello spazio originale in maniera che esso sia rappresentato senza correlazioni in un sistema spaziale con nuove componenti (RICHARDS 1986). Tali componenti enfatizzano similarità e differenze che l'algoritmo rileva ed elabora tra pixel corrispondenti delle immagini multispettrali di partenza³². L'incidenza della correlazione è particolarmente elevata per superfici vegetate. Si registra infatti una correlazione negativa tra VIR e rosso ed una

³¹ Valutare la qualità delle immagini ottenute dagli algoritmi di *data fusion* è un compito decisamente complesso. Una valutazione analitica sulla qualità generalmente richiede il calcolo di differenti indici, tra cui il coefficiente di correlazione medio (CC) tra ciascuna banda multispettrale fusa ed il suo riferimento, oppure altri indici più rivolti a misurare la distorsione spettrale introdotta dal processo di fusione. In generale, alcuni metodi di fusione conservano accuratamente l'informazione radiometrica a seguito del miglioramento spaziale introdotto sul dato multispettrale, altri invece sono specificamente ideati per mantenere inalterata l'informazione spettrale.

³² La PCA crea nuove immagini decorrelate fra di loro, denominate componenti principali, pari al numero di canali processati attraverso la roto-traslazione del sistema di coordinate nel quale ciascun punto è collocabile in base ai valori di ciascun canale. Nel caso di QuickBird, i 4 canali (blu, verde, rosso e VIR) generano 4 nuove immagini, in ordine crescente della varianza. La prima (PC1) è il risultato della somma di tutte le bande, ciascuna con un peso proporzionale al grado di originalità dell'informazione in essa contenuta. La seconda componente principale (PC2) rappresenta il valore assoluto del discostamento in termini di riflettanza di ogni pixel rispetto all'asse della PC1. La terza e la quarta possono rappresentare elementi di rumore. Pertanto le prime due componenti forniscono un contributo significativo nell'enfatizzare tracce e discontinuità di interesse archeologico.

correlazione di tipo positivo tra le bande del visibile. Tale fenomeno è dovuto alle caratteristiche spettrali della vegetazione che è un alto riflettore nel VIR; viceversa ha valori bassi di riflessione nel canale rosso.

Considerato che la vegetazione costituisce in molti casi un fattore di mediazione importante per l'individuazione di strutture antiche sepolte, la PCA è impiegata con successo anche in ambito archeologico, non solo su superfici vegetate ma anche su suoli nudi; in questo caso entra in gioco il diverso comportamento spettrale del rosso e del VIR in presenza di umidità.

3.2.2 Indici spettrali di vegetazione

Gli indici di vegetazione consentono di enfatizzare la presenza, il tipo e lo stato della vegetazione. Tali indici possono essere di grande utilità per identificare l'esistenza di strutture sepolte, poiché queste inducono delle modifiche sulla crescita e fenologia della vegetazione soprastante. Tali modifiche possono essere apprezzate nel campo del visibile e, in misura maggiore, in altre bande dal vicino infrarosso all'infrarosso (LASAPONARA, MASINI 2007) e quindi da indici spettrali. Alcuni di questi indici sono ottenuti dal rapporto di bande spettrali opportunamente selezionate, altri sono basati su combinazioni lineari delle stesse.

Tra gli indici basati su rapporti tra bande spettrali il più utilizzato è l'indice noto come NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Esso è ottenuto dalla differenza normalizzata della radianza o riflettanza³³ dell'infrarosso vicino e del rosso, come si evince dalla seguente formula³⁴: $NDVI = (VIR\text{-Rosso}) / (VIR + Rosso)$. NDVI utilizza la bassa riflettanza della vegetazione nella banda del rosso, corrispondente al massimo assorbimento della clorofilla, e la elevata riflettanza nel vicino infrarosso, dovuta alle componenti della parete cellulare delle piante. L'utilizzo di tale indice in campo archeologico può consentire di enfatizzare tracce di accrescimento differenziale di vegetazione legato a presenze sepolte, sia positive che negative (LASAPONARA, MASINI 2006b).

Altri indici utilizzati sono tutti ottenuti da relazioni che rispondono al diverso comportamento spettrale delle vegetazione nel VIR e nello spettro

³³ Con il termine radianza si intende la misura effettuata mediante tecniche di telerilevamento della radiazione di superficie. Nello spettro del visibile e nel vicino infrarosso si misura la radiazione riflessa dalla superficie, che viene pertanto indicata con il termine riflettanza.

³⁴ ROUSE *et al.* 1973. Il rapporto da cui si ottiene l'indice NDVI evidenzia le diverse proprietà di riflettanza della vegetazione nelle regioni spettrali del rosso, dove la riflettanza fogliare mostra un minimo dovuto all'assorbimento delle radiazioni incidenti da parte dei pigmenti clorofilliani, e dell'infrarosso vicino, dove la riflettanza aumenta a causa della riflessione da parte del mesofillo fogliare. L'indice NDVI, essendo normalizzato, varia in un intervallo compreso tra -1 e +1. In presenza di vegetazione ha sempre un valore positivo che dipende strettamente dal tipo di vegetazione, dalla sua densità e stato, fenologia, etc. Diversi studi empirici riferiscono di una stretta relazione quasi-lineare tra i valori di NDVI e la quantità di radiazione fotosinteticamente attiva assorbita dalla vegetazione; sulla base di tale relazione si può considerare l'indice NDVI uno strumento efficace per la stima del tasso fotosintetico dello strato fogliare.

del visibile³⁵. Tra gli indici ricavati da combinazioni lineari di bande spettrali si segnala la *Tasselet Cap Transformation* (TCT); si tratta di una trasformazione lineare affine che converte un data set di canali in un nuovo data set di immagini, ossia, un nuovo sistema di coordinate di riferimento ottenuto mediante dei coefficienti ricavati per via sperimentale per i vari sensori. Il primo algoritmo di TCT è stato messo a punto negli anni '70 per le bande del sensore Landsat MSS (KAUTH, THOMAS 1976); la TCT è stata poi estesa ad altri sensori quali Landsat TM (CRIST, CICONE 1984), ETM, Ikonos (HORNE 2003) ed infine QuickBird (YARBROUGH *et al.* 2005).

Nei casi di studio analizzati (cfr. *infra* § 3.5.4) è stata impiegata con successo la TCT con coefficienti mutuati da quelli ricavati empiricamente per i dati Landsat ETM ed Ikonos³⁶. Come si evince dai pesi assegnati alle varie bande spettrali, possiamo distinguere tre bande composte con tre specifiche caratteristiche prestazionali. La prima è una somma calcolata con pesi crescenti dal blu al VIR, che dal punto di vista fisico mette in evidenza la brillanza superficiale e perciò è definita *brightness*. La seconda misura il contrasto tra bande visibili ed il VIR, come si evince dal peso maggiore assegnato al VIR rispetto agli altri canali; il risultato è una sorta di indice di vegetazione, denominato *greenness*, particolarmente efficace per superfici vegetate. La terza banda è caratterizzata da un peso maggiore assegnato al rosso. Essa è generalmente interpretata come un indice di misura dell'umidità al suolo e nella vegetazione. Per tale ragione è nota come *wetness* e trova una efficace applicazione in studi di carattere paleo-geografico finalizzati alla individuazione di reticolli idrografici sepolti, come verrà mostrato nel caso di studio relativo ai paleo-alvei di Metaponto (cfr. *infra* § 3.5.4.).

3.3 Edge detection

Gli algoritmi di *edge detection* consentono di enfatizzare ed estrarre anomalie e discontinuità di superficie, come, ad esempio, il contorno di un oggetto, ossia la linea di separazione tra l'oggetto e lo sfondo. Tali algoritmi,

³⁵ *Ratio Vegetation Index* (RVI = VIR / Rosso), JORDAN 1969; *Difference Vegetation Index* (DVI = VIR – Rosso), TUCKER 1979; *Green Normalised Difference Vegetation Index* (GNDVI = (VIR – Verde) / (VIR + Verde)), GITELSON, MERZLYAK 1998.

³⁶ La TCT per immagini ETM è data dalle seguenti espressioni:

$$TCT_{ETM}\text{-band 1} = 0.1544 \text{ blu} + 0.2552 \text{ verde} + 0.3592 \text{ rosso} + 0.5494 \text{ VIR}$$

$$TCT_{ETM}\text{-band 2} = -0.1009 \text{ blu} - 0.1255 \text{ verde} - 0.2866 \text{ rosso} + 0.8226 \text{ VIR}$$

$$TCT_{ETM}\text{-band 3} = 0.3191 \text{ blu} + 0.5061 \text{ verde} + 0.5534 \text{ rosso} + 0.0301 \text{ VIR}.$$

La TCT per immagini Ikonos è data dalle seguenti espressioni:

$$TCT_{IKONOS}\text{-band 1} = 0.326 \text{ blu} + 0.509 \text{ verde} + 0.560 \text{ rosso} + 0.567 \text{ VIR}$$

$$TCT_{IKONOS}\text{-band 2} = -0.311 \text{ blu} - 0.356 \text{ verde} - 0.325 \text{ rosso} + 0.819 \text{ VIR}$$

$$TCT_{IKONOS}\text{-band 3} = -0.612 \text{ blu} - 0.312 \text{ verde} + 0.722 \text{ rosso} - 0.081 \text{ VIR}$$

$$TCT_{IKONOS}\text{-band 4} = -0.650 \text{ blu} + 0.719 \text{ verde} - 0.243 \text{ rosso} - 0.031 \text{ VIR}.$$

nel processamento di immagini digitali, sono basati sulla discontinuità di proprietà dei pixel, quali il livello di grigio, il colore, la regolarità spaziale. L'*edge detection* può essere effettuata direttamente sull'immagine (singolo canale o composizione RGB) o su grandezze derivate ottenute applicando opportune trasformazioni.

Esistono molteplici classi di algoritmi di *edge detection*, che possono essere distinti in base agli operatori matematici che adottano. I più diffusi basano il loro funzionamento sul fatto che la presenza di un contorno nell'immagine sottintende una discontinuità nella funzione di intensità e quindi un picco del suo gradiente. Tali metodi utilizzano la derivata prima che consente di individuare i punti di discontinuità; la derivata prima del profilo è positiva in corrispondenza di una transizione scuro-chiaro, negativa in corrispondenza di una transizione chiaro-scuro³⁷.

In presenza di rumore, l'estrazione dei contorni può risultare particolarmente complessa e rendere necessario un opportuno filtraggio. A tale scopo molti algoritmi utilizzano il gradiente dell'immagine preventivamente smussata mediante un filtro gaussiano. La presenza di ombre può generare falsi contorni che possono essere rimossi mediante procedure di *thresholding*, ossia attraverso l'applicazione di valori di soglia. Il risultato finale dipende strettamente dalla scelta dei valori delle soglie, del "settaggio" di alcuni parametri, del filtro gaussiano, etc.

3.4 Metodo di valutazione quantitativa della separabilità spettrale

Per valutare la performance di un canale spettrale e/o di una tecnica di elaborazione nell'evidenziare tracce di interesse archeologico è necessario disporre di un indicatore analitico che consenta di effettuare una valutazione oggettiva, e quindi quantitativa, da affiancare a quella qualitativa data dall'esame visivo. A tal fine è stato adottato un indicatore che dà conto della diversa separabilità spettrale, ossia della differenza di riflettanza tra una traccia individuata mediante l'osservazione visiva ed il suo intorno. Attraverso l'analisi degli istogrammi (Fig. 11), che forniscono la rappresentazione grafica della quantità di pixel presenti nell'immagine per ciascun livello di grigio, si ricavano i valori minimo, massimo, medio di riflettanza e le deviazioni standard in corrispondenza di una "maschera" posta in corrispondenza della traccia (m1) e di un'altra individuata nell'intorno della traccia stessa (m2). Il rapporto tra la differenza dei valori medi di riflettanza e la somma delle deviazioni standard in corrispondenza delle due maschere fornisce un indicatore numerico del

³⁷ Altri metodi utilizzano la derivata seconda, detta il Laplaciano, che, come la derivata prima, risulta diversa da zero solo in corrispondenza delle transizioni. Ci sono però significative differenze tra i due operatori; infatti, la derivata seconda è positiva in prossimità del lato scuro di un contorno, negativa presso il lato chiaro.

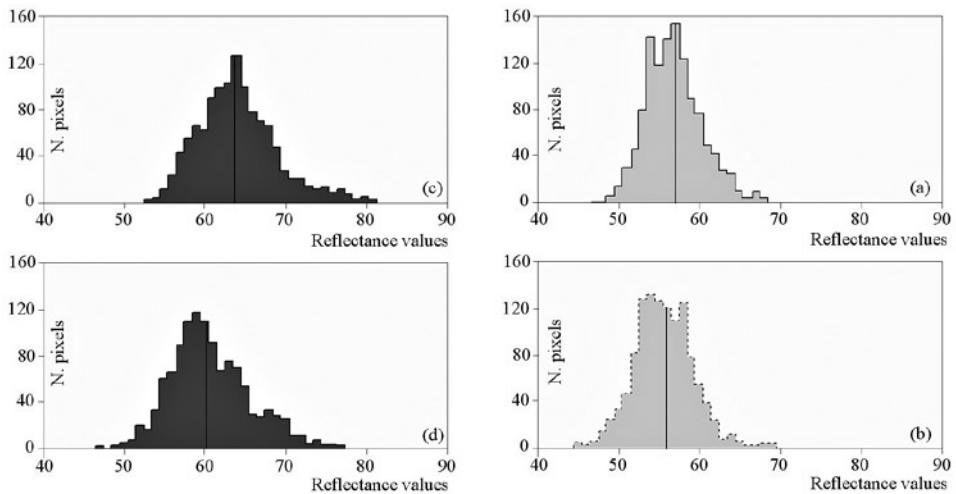


Fig. 11 – Monte Serico. Istogrammi relativi ai valori di riflettanza nel pancromatico in corrispondenza delle tracce (a) e dell'intorno (b), nel canale rosso in corrispondenza delle tracce (c) e dell'intorno (d).

contrasto tra la feature archeologica ed il suo intorno. All'aumentare del valore dell'indicatore aumenta la separabilità e quindi la possibilità di identificare il maggior numero possibile di tracce.

3.5 Casi studio

I casi di studio che si presentano dimostrano come le immagini satellitari ad alta risoluzione possano fornire un contributo significativo al rilevamento di presenze sepolte di interesse archeologico e paleo-ambientale. Le applicazioni descritte evidenziano molto spesso un minore contrasto delle feature nel pancromatico rispetto ad altri canali ed ai prodotti delle varie tecniche di elaborazione impiegate. Dunque, la minore risoluzione spaziale rispetto ad immagini aeree può essere compensata massimizzando le risorse spettrali attraverso metodologie di processamento dei dati basate sull'impiego del *data fusion* e di tecniche di *enhancement* e di *edge detection*.

3.5.1 Monte Irsi

L'area di studio è un villaggio medievale abbandonato ubicato su un altopiano, nei pressi della confluenza dei fiumi Bradano e Basentello, in Basilicata, vicino il confine con la Puglia (Fig. 12). Il sito è caratterizzato dalla presenza di vegetazione spontanea costituita da graminacee.

L'ubicazione strategica di Monte Irsi ha favorito una lunga ed intensa attività umana dal Paleolitico al Medioevo, come attestato da varie campagne di ricognizione archeologica (JANORA 1987). Per quanto riguarda l'età medie-



Fig. 12 – Ubicazione dei casi di studio nell’Italia meridionale.

vale, i documenti riportano la presenza di un monastero e di un insediamento che raggiunse la massima espansione tra XII e XIII sec. e fu abbandonato nel XV sec., dopo la distruzione del monastero avvenuta intorno al 1370 (SMALL 1976; SMALL *et al.* 1998). Tracce dell’insediamento sepolto sono state rilevate attraverso l’elaborazione e l’interpretazione di immagini QuickBird nel 2006 (LASAPONARA, MASINI 2006). I *crop-marks* ben visibili sia nell’immagine pancromatica che nel VIR ottenuto dal *data fusion* hanno consentito di individuare segni riferibili ad un fossato ed a strutture sepolte, in particolare sulla cima dell’altopiano collinare (Fig. 13).

Il caso di studio di Monte Irsi viene proposto al fine di effettuare un’analisi comparata della separabilità spettrale di diversi algoritmi di *data fusion*. In particolare sono stati messi a confronto la PCA, la TCT, l’IHS, l’approccio moltiplicativo, la trasformata di Brovey e l’algoritmo di Zhang. La fusione è stata effettuata tra i singoli canali spettrali e l’immagine pancromatica. Dall’ispezione visuale emerge con chiarezza che il VIR fornisce i risultati migliori dal punto di vista della lettura e dell’estrazione di tracce, in gran parte *crop-marks* (Fig. 13b, c, d); la ragione è legata alle caratteristiche superficiali del sito, caratterizzato da una significativa copertura vegetale.

La Tab. 1 mostra i valori minimo, massimo e medio (μ) di riflettanza in corrispondenza delle maschere ubicate sulle tracce (m1) e nel loro intorno (m2), la deviazione standard (σ), la differenza tra i valori medi di riflettanza ($\Delta\mu$) e l’indicatore statistico di separabilità spettrale ($SSI = \Delta\mu / (\sigma_1 + \sigma_2)$), che

Immagini		maschere	min	max	μ	σ	$\Delta\mu$	SSI= $\Delta\mu/(\sigma 1 + \sigma 2)$
Pancromatico		m1	47	76	58,99	4,41	2,65	0,308
		m2	48	73	56,34	4,18		
Zhang algorithm	verde	m1	44	57	49,1	2,54	0,73	0,155
		m2	42	57	48,37	2,17		
	rosso	m1	22	47	35,7	3,98	0,27	0,039
		m2	27	46	35,43	3,01		
	VIR	m1	59	131	80,57	8,91	5,73	0,359
		m2	59	99	74,84	7,03		
PCA	verde	m1	196,25	212,76	203,25	3,33	1,39	0,218
		m2	195,17	212,76	201,86	3,05		
	rosso	m1	10,68	33,27	10,68	4,39	2,23	0,269
		m2	8,45	31,67	8,45	3,91		
	VIR	m1	-9,75	12,47	3,42	3,27	-1,65	-0,272
		m2	-6,95	11,47	5,07	2,8		
TCT	verde	m1	10,4	30,25	21,59	2,57	0,22	0,046
		m2	14,57	30,39	21,37	2,23		
	rosso	m1	14,64	33,58	25,17	2,64	0,39	0,079
		m2	18,16	34,71	24,78	2,3		
	VIR	m1	38,11	75,66	53,16	6,97	4,22	0,335
		m2	36,79	66,18	48,94	5,63		
Approcio multipliattivo	pan*verde	m1	2208	3960	2919,8	320,37	162,77	0,258
		m2	2156	3960	2757,03	310,44		
	pan*rosso	m1	1512	3264	2141,85	318,59	114,75	0,193
		m2	1470	3105	2027,1	274,53		
	pan*VIR	m1	3149	7070	4727,8	723,68	467,8	0,352
		m2	3168	6552	4260	606,22		
Trasformata di Brovey	verde	m1	11,66	18,16	14,4	1,02	0,42	0,209
		m2	11,78	18,25	13,98	0,99		
	rosso	m1	7,1	14,51	10,56	1,19	0,29	0,131
		m2	8,03	14,31	10,27	1,03		
	VIR	m1	16,84	33,04	23,29	2,68	1,71	0,348
		m2	16,85	29,78	21,58	2,23		
IHS	I: Intensità	m1	49	68	57,68	3,86	2,48	0,340
		m2	49	66	55,2	3,44		
	H: Colore	m1	216	242	231,98	3,65	-0,26	-0,044
		m2	215	242	232,24	2,2		
	S: Saturazione	m1	24	66	37,41	8,11	3,6	0,254
		m2	23	52	33,81	6,07		

Tab. 1 – Monte Irsi: valori minimo, massimo e medio di riflettanza, deviazioni standard ed in corrispondenza delle feature (m1) e del loro intorno (m2) per i metodi di *data fusion* considerati. La separabilità spettrale più elevata si registra per l'algoritmo di Zhang.

misura la separabilità ovvero il contrasto tra i *marks* e l'immediato intorno; ne emerge che i valori più elevati dell'indicatore SSI sono relativi al vicino infrarosso. Dal confronto tra i vari algoritmi di *data fusion* si evince che la performance più soddisfacente è data dall'algoritmo di Zhang ($SSI_{VIR}=0,359$),

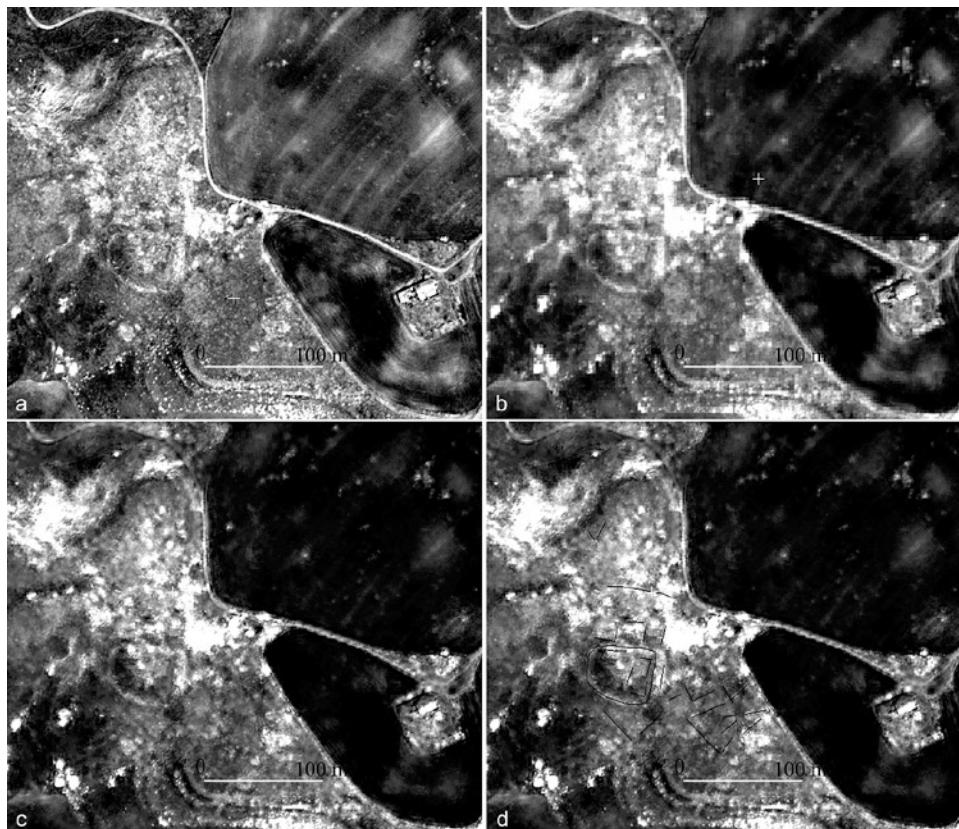


Fig. 13 – Monte Irsi: (a) immagine panchromatica; (b) *data fusion* pan x VIR; (c) VIR prodotto del *data fusion* con algoritmo di Zhang (ZHANG 2004); (d) immagine precedente con individuazione delle tracce di interesse archeologico.

seguito dall'approccio moltiplicativo ($SSI_{VIR}=0,352$) e la trasformata di Brovey ($SSI_{VIR}=0,348$); discreti sono i valori di SSI della TCT ($SSI_{VIR}=0,335$) e dell'IHS in corrispondenza della intensità ($SSI=0,348$).

Per gli algoritmi sopra citati si registrano valori più alti di separabilità spettrale, in corrispondenza del VIR, rispetto a quelli rilevati nel panchromatico ($SSI=0,308$). Infine, mediocri sono i risultati ottenuti dalla PCA, che è sicuramente più efficace come tecnica di *enhancement* (cfr. *infra*).

3.5.2 Monte Serico

Il sito è ubicato su una collina (520 m s.l.m.) che domina l'alta valle del Bradano nel nord-est della Basilicata (Fig. 12). Dal punto di vista geologico,

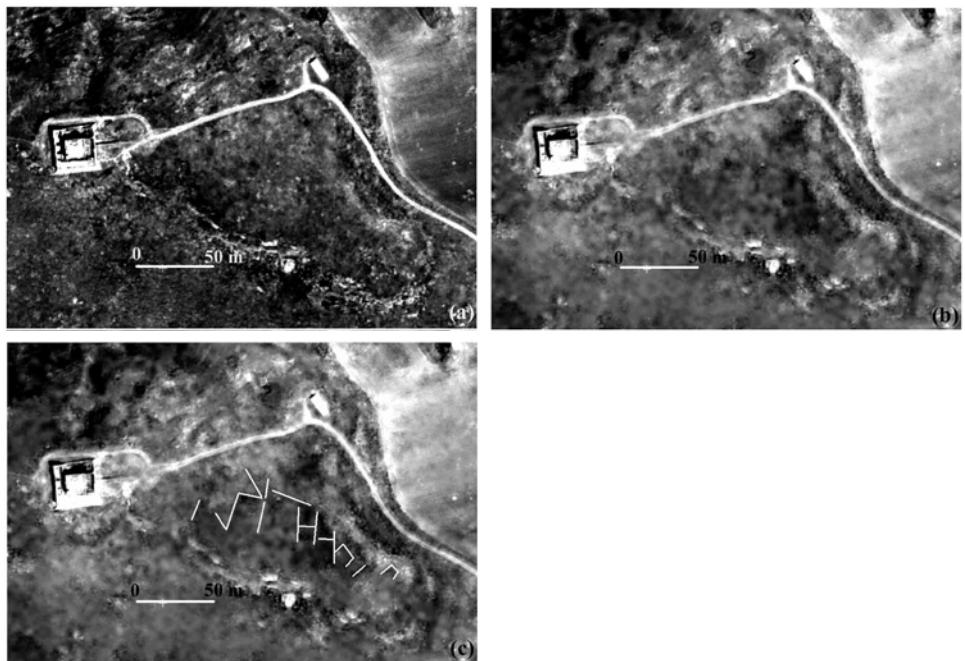


Fig. 14 – Monte Serico: (a) pancromatico; (b) canale rosso (prodotto del *data fusion*); (c) immagine precedente con individuazione delle tracce di interesse archeologico.

Maschere/dati	Pancromatico				Canale rosso			
	μ	σ	$\Delta\mu$	$SSI=\Delta\mu/(\sigma_1+\sigma_2)$	μ	σ	$\Delta\mu$	$SSI=\Delta\mu/(\sigma_1+\sigma_2)$
m1: features	56,86	3,46	1,31	0,188	64,18	4,93	3,48	0,358
m2: intorno	55,55	3,49			60,7	4,8		

Tab. 2 – Monte Serico: analisi comparata della separabilità spettrale tra marks ed intorno nel pancromatico e nel canale rosso.

Monte Serico è composto da una sequenza stratigrafica costituita da argille subappenniniche, sabbie di Monte Marano e conglomerati di Irsina; questi ultimi sono, in molte parti, affioranti, rendendo difficile l'interpretazione delle tracce. La superficie del terreno è caratterizzata da sporadiche piante graminacee.

Le fonti storiche attestano l'esistenza di un castello nell'XI sec. e di un centro abitato nel XIII sec., che raggiunse la massima espansione verso la fine dello stesso secolo, iniziò gradualmente a spopolarsi nella seconda metà del 1300 e venne abbandonato nella prima metà del 1400. Ad oggi le uniche evidenze architettoniche conservate sono un castello ed una chiesa. Sul versante sud della collina, murature di fondazione, materiale lapideo frammentario e tegole sugge-

riscono la presenza di un insediamento. Nel 1995, un volo aereo ha consentito la scoperta ed i primi rilievi di tale abitato (MASINI 1995); a questo studio ne è seguito un altro effettuato nel 2005 con l'ausilio di immagini satellitari QuickBird (LASAPONARA, MASINI 2005), che ha fornito ulteriori informazioni utili per la ricostruzione dell'articolazione planimetrica del casale medievale (Fig. 14).

L'individuazione di segni riferibili a strutture sepolte è stata un'operazione complessa a causa di fenomeni di erosione e dilavamento dei versanti, che hanno rimaneggiato e reso caotici tracce di microrilievo e *soil-marks* riferibili a presenze antiche sepolte. L'individuazione delle tracce è stata resa possibile mediante il *data fusion* (ZHANG 2004) che ha ottimizzato risoluzioni spaziali e radiometriche; i risultati più significativi sono stati ottenuti dalla fusione del pancromatico con il canale rosso che ha messo in evidenza segni della maglia urbana e tratti di cinta muraria (Fig. 14b)³⁸. Molto meno efficaci si sono rivelati il pancromatico (Fig. 14a) e gli altri canali, quali il verde ed il VIR. Come si vede nella Tab. 2, i valori di separabilità spettrale di *shadow* e *soil-marks* individuati nel pancromatico e nel rosso sono in rapporto di circa 1:2. La migliore risposta spettrale del rosso è legata alla maggiore sensibilità a rilevare differenze nel contenuto di umidità, che nel caso di Monte Serico ha rappresentato l'indicatore visivo più rilevante.

In confronto agli altri casi di studio, ulteriori elaborazioni con tecniche di *enhancement* non hanno aggiunto nulla in termini quantitativi e qualitativi rispetto a quanto ricavato dal *data fusion*.

3.5.3 Jure Vetere

Jure Vetere rappresenta il primo insediamento monastico dell'Ordine Florense, fondato da Gioacchino da Fiore verso la fine del XII sec. Si trova in Calabria, nel nord della Sila (Fig. 12), su un altopiano collinare che si affaccia sullo spartiacque tra il fiume Arco ed uno dei suoi affluenti. Campagne di scavo eseguite tra gli anni 2002 e 2004 hanno riportato alla luce fondazioni e murature della chiesa e di ambienti del cenobio (ROUBIS, SOGLIANI, LAZZARI 2003). Le prospettive della ricerca archeologica hanno suggerito di allargare l'indagine all'intero altopiano collinare; pertanto è stata effettuata una proiezione dell'area e del territorio circostante con immagini QuickBird³⁹.

Quello di Jure Vetere è stato un caso di studio significativo per evidenziare l'importanza dell'impiego integrato di varie tecniche di *enhancement* e di *edge*

³⁸ Nel complesso, le oltre 30 tracce che sono state rilevate compongono una griglia di linee inscritta in un'area quadrangolare della superficie di circa 8000 m². Le lunghezze delle tracce rilevate variano in un intervallo compreso tra 7,1 e 31,3 m; dunque la lunghezza minima discriminata è intorno a 7 m che è sufficiente per ricostruire la forma urbana, dall'isolato alla singola costruzione (LASAPONARA, MASINI 2005).

³⁹ Le immagini QuickBird sono state acquisite l'11-06-2004. I metadati di tali immagini sono i seguenti: copertura nuvolosa 5%, risoluzione del pancromatico 0,64 m, risoluzione del multispettrale 2,56 m, angolo *off-nadir* 14°.

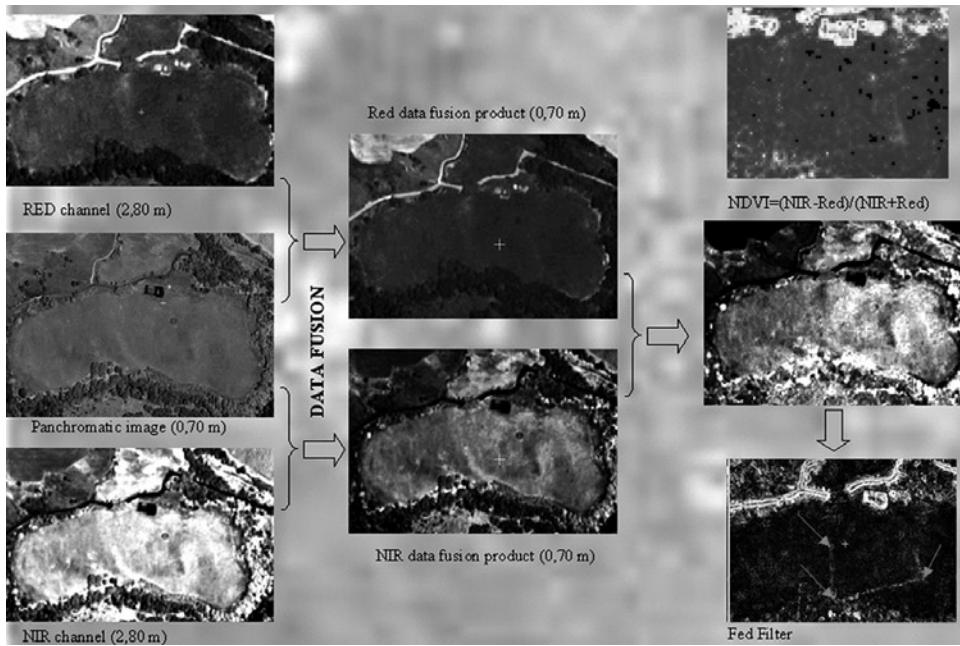


Fig. 15 – Jure Vetere: fasi di elaborazione delle immagini (*data fusion*, *enhancement* con indici di vegetazione NDVI ed *edge detection* con *Fed Filter*).

detection al fine di rilevare presenze antiche sepolte (Fig. 15). In particolare l’indice NDVI ha consentito di individuare anomalie riferibili ad evidenze negative⁴⁰; l’affinamento attraverso l’*edge detection* effettuata con *Fed Filter* ha evidenziato tracce di morfologia lineare⁴¹. Una successiva validazione avvenuta con prospezioni geoelettriche ha confermato la natura di presenza negativa della traccia estratta. Infine, un saggio di scavo ha riportato alla luce un’opera di drenaggio coeva alla fase di occupazione del sito da parte dei monaci dell’Ordine Florense.

3.5.4 Metaponto

L’ultimo caso di studio riguarda Metaponto, situato tra i fiumi Basento e Bradano, nel sud-est della Basilicata (Fig. 12). Le numerose campagne di scavo e di riconoscimento archeologico hanno attestato una lunga ed intensa occupazione umana dell’area dall’VIII sec. a.C. fino a tutta l’età romana; in particolare, nella

⁴⁰ All’epoca dell’acquisizione dell’immagine satellitare, la superficie era caratterizzata da una folta copertura di graminacee spontanee; ciò ha reso particolarmente performante il VIR e gli indici di vegetazione (LASAPONARA, MASINI 2006b).

⁴¹ Nel caso di studio di Jure Vetere l’algoritmo di *edge detection* impiegato calcola, per il dato pixel P, la media μ_P del valore assoluto della differenza di P e dei pixel contenuti in un intorno dato da una finestra di dimensioni $n \times n$ (con n dispari).



Fig. 16 – Metaponto, sito A: (a) immagine pancromatica; (b) prodotto della PCA2; (c) VIR; (d) ricostruzione delle feature rilevate a sud ed a sud-ovest del Parco Archeologico, riferibili ad una *plateia*, orientata SO-NE, ed agli *stenopoi*, orientati SE-NO (v. frecce rispettivamente nere e bianche in b) che si sviluppano in continuità e con lo stesso orientamento della maglia urbana già conosciuta.

fase relativa alla *polis* greca le evidenze archeologiche più significative sono costituite dai monumenti all'interno del Parco Archeologico (area templare, teatro ed agorà), dalle diverse necropoli e dalle c.d. Tavole Palatine. Oggetto di indagine nell'ultimo decennio è stato in particolare il disegno urbano di Metaponto, di cui pare acclarata una maglia ortogonale con *plateiai* e *stenopoi*⁴². La storia della città presenta poi ulteriori motivi di interesse anche per quanto riguarda l'entroterra, nel quale le diverse campagne di prospezione, cognizione e scavo eseguite tra gli anni '70 ed i primi anni '90 hanno messo in evidenza un uso intensivo del territorio con insediamenti rurali e fattorie e con un esteso sistema di divisioni agrarie (ADAMESTEANU 1973; CARTER 1983, 1990). Queste ultime sarebbero state costituite da confini, viottoli e/o canali di drenaggio realizzati in epoche nelle quali il livello di falda era diverso da quello attuale e la linea di costa si trovava più all'interno (CARTER 1990). Dunque, il rilievo di tali divisioni si intreccia con lo studio dei quadri ambientali passati e, in particolare, con la ricostruzione della paleo-idiografia, che in parte si conserva sotto forma di confini e di fossi ed in parte è sepolta (BOENZI *et al.* 1988).

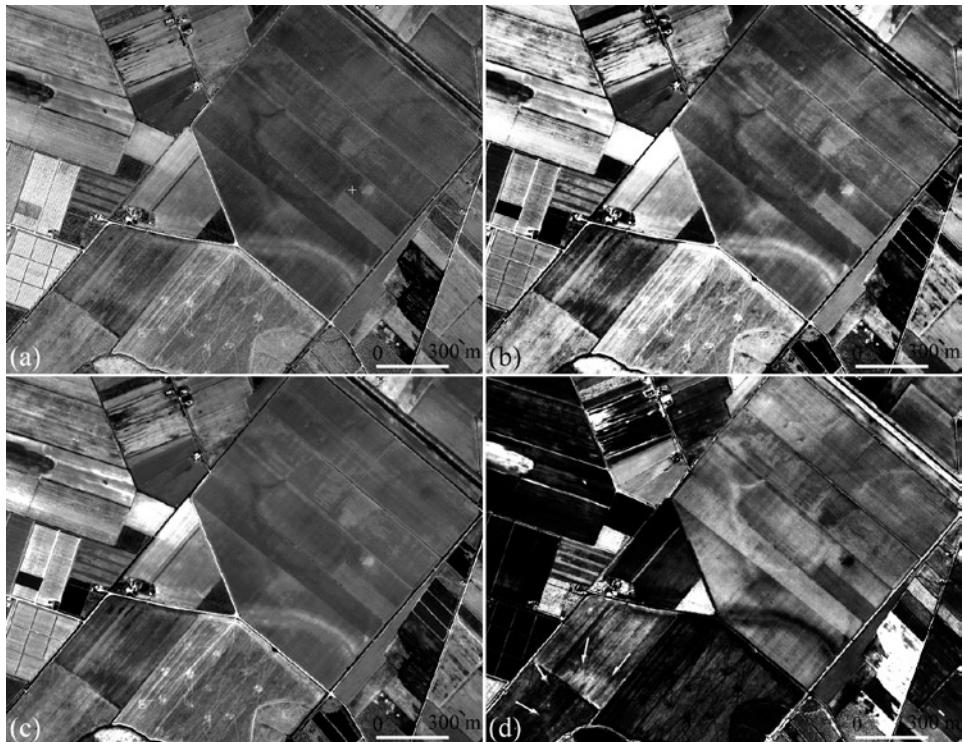


Fig. 17 – Metaponto, paleo-alvei 1 e 2: (a) immagine pancromatica; (b) rosso; (c) prodotto della TCTetm3; (d) prodotto della PCA1. Si noti come la PCA1 enfatizzi i contorni di un ramo di paleo-alveo, in basso a sinistra.

Immagini/siti	sito A	sito B	paleoalveo1	paleoalveo2
$\Sigma \Sigma I = \Delta \mu / (\sigma_1 + \sigma_2)$				
Canale Rosso	-0,348	0,115	-0,396	0,766
Canale VIR	0,387	-0,025	-0,320	0,761
Pancromatico	0,052	0,112	-0,342	0,734
TCT _{etm1} _brightness	0,273	0,075	-0,367	0,741
TCT _{etm2} _greenness	0,403	-0,058	-0,248	0,655
TCT _{etm3} _wetness	-0,313	0,118	-0,362	0,776
TCT _{iko1}	0,142	0,106	-0,375	0,782
TCT _{iko2}	0,409	-0,076	-0,171	0,201
TCT _{iko3}	-0,324	0,042	-0,148	
PCA 1	-0,197	-0,093	0,367	-0,784
PCA 2	-0,408	0,082	0,101	0,149

Tab. 3 – Metaponto, siti A e B e paleo-alvei 1 e 2. Risultati dell’analisi comparata tra i vari canali ed i prodotti di tecniche di *enhancement* della separabilità spettrale delle feature di interesse archeologico.

Allo stato attuale non vi sono elementi che consentono di conoscere l’evoluzione storica dei fenomeni di trasformazione ambientale, tra i quali lo spostamento della linea di costa, in relazione alle dinamiche insediative. I dati archeologici per quanto riguarda l’età pre-medievale e la documentazione storica di età medievale e moderna (si pensi al porto di età federiciana: HUIL-LARD-BRÈHOLLES 1857, 419) potranno consentire, in una visione integrata con le diverse tecniche di *remote sensing*, di ricostruire scenari storico-ambientali attendibili. In questa prospettiva si è fatto uso di immagini QuickBird, la cui elaborazione ha consentito di individuare nuovi segni riferibili a *land divisions* ed a paleo-alvei sepolti facenti parte di un esteso e ramificato paleo-reticolo idrografico connesso al corso del fiume Bradano (MASINI, LASAPONARA 2006).

Le aree oggetto di elaborazione sono state quattro: una relativa a tracce riferibili all’impianto urbano di Metaponto (sito A), un’altra ubicata nell’entroterra e con tracce riconducibili a divisioni agrarie (sito B), altre due caratterizzate dalla presenza di paleo-alvei (1 e 2). Il sito A è ubicato a sud ed a sud-est del Parco Archeologico contiguo all’area già indagata alla fine degli anni ’90 (CIMINALE, RICCHETTI 1999; DE SIENA 1999). Le immagini QuickBird, dai vari canali ai prodotti di trasformazione mediante tecniche di *enhancement*, hanno evidenziato tracce del tipo *crop-marks*, che potrebbero riferirsi – e il condizionale è d’obbligo se non si passa alla verifica attraverso prospezioni geofisiche e saggi di scavo – ad un settore del tessuto urbano che si sviluppa in continuità con la maglia di assi viari già individuata (Fig. 16). Riguardo alla risposta spettrale dei canali e dei prodotti di trasformazione, si precisa che le tracce sono particolarmente visibili nel VIR (Fig. 16c), meno visibili nel rosso e non visibili nel pancromatico (Fig. 16a). Ciò è confermato anche dai valori calcolati di SSI relativi alle tre immagini, pari rispettivamente a -0,348, 0,387 e 0,052. Un ulteriore miglioramento del contrasto è ottenuto dalla TCT_{etm2}, TCT_{iko2} e dalla PCA2 (Fig. 16b), per i quali l’indicatore di separabilità spettrale è dato rispettivamente da 0,403, 0,409 e -0,408 (Tab. 3). Tali risultati si spiegano per la presenza di vegetazione che esalta il potere riflettente nella banda del VIR, enfatizzato ulteriormente dal *greenness* delle due TCT.

Il sito B si trova in contrada S. Salvatore, nell’entroterra metapontino, e presenta una superficie pressoché priva di vegetazione. Le divisioni agrarie rilevate sono in generale poco contrastate, come si evince dai valori bassi di separabilità spettrale (Tab. 3). Del data set di partenza, il canale rosso ed il pancromatico forniscono le migliori performance (valori di SSI rispettivamente pari a 0,115 e 0,112), di poco migliorate dalla TCT_{etm3} (SSI=0,118); in questo caso entra in gioco la differenza di umidità che favorisce un maggior contrasto dei *marks* nel canale rosso e nel *wetness* (ovvero nel prodotto TCT_{etm3}).

Tale comportamento si registra con maggiore intensità nei paleo-alvei (Fig. 17). In particolare, nel paleo-alveo 1, caratterizzato da una copertura vegetata rada, il maggiore contrasto si rileva nel canale rosso (SSI=-0,396). Di-

screta è la performance delle trasformate TCT_{etm1} , TCT_{etm3} , TCT_{ikoe} e della PCA1 con valori di SSI pari rispettivamente a -0,367, -0,362, -0,375 e 0,367 (Tab. 3, Fig. 17c). Il paleo-alveo 2 è notevolmente più contrastato del paleo-alveo 1; la presenza di una maggiore vegetazione favorisce una separabilità spettrale del VIR pari quasi a quella del rosso. Un leggero miglioramento si ottiene infine dalle TCT_{etm3} e TCT_{ikoe} e soprattutto dalla PCA1 (Tab. 3, Fig. 17d).

R.L., N.M.

ROSA LASAPONARA

Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale
CNR – Potenza

NICOLA MASINI, GIUSEPPE SCARDOZZI

Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali
CNR – Lecce

BIBLIOGRAFIA

ADAMESTEANU D. 1973, *Le suddivisioni di terra nel metapontino*, in M.I. FINLEY (ed.), *Problèmes de la terre en Grèce ancienne*, Paris, Mouton, 49-61.

ASTORI B., SPANÒ A. 2005, *Contenuti metrici e tematici della cartografia della città di Hierapolis e basi per il suo aggiornamento*, in D. RONCHETTA (ed.), *Paolo Verzone 1902-1986. Tra storia dell'architettura restauro archeologia*, Torino, CELID, 136-145.

BAIOCCHI V., CRESPI M., DE VENDITIS L., GIANNONE F. 2004, *Ortorettificazione di immagini satellitari ad alta risoluzione per scopi cartografici: metodologie ed implementazione di un nuovo software*, «*Bollettino SIFET*», 1, 11-33.

BECK A. 2006, *Google Earth and World Wind: Remote Sensing for the masses?*, «*Antiquity*», 80, 308 (<http://antiquity.ac.uk/>).

BITELLI G., GIRELLI V.A., REMONDINO F., VITTUARI L. 2006, *Surface modelling of complex archaeological structures by digital close-range photogrammetry*, in CAMPANA, FORTE 2006, 321-326.

BOENZI F., CHERUBINI C., GIASI C.I., DE SIENA A. 1988, *Engineering geology around the ancient urban area of Metaponto (Lucania, Italy)*, in *Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites*, Rotterdam, 1633-1638.

CAMPANA S. 2002, *High resolution satellite imagery: A new source of information to the archaeological study of Italian landscapes? Case study of Tuscany*, in *Space Applications for Heritage Conservation. Proceedings of the Conference (Strasbourg 2002)*, European Space Agency Publication Division, CD-ROM.

CAMPANA S. 2004, *Le immagini da satellite nell'indagine archeologica: stato dell'arte, casi di studio, prospettive*, «*Archeologia Aerea. Studi di Aerotopografia Archeologica*», 1, 279-299.

CAMPANA S., FORTE M. (eds.) 2006, *From Space to Place. Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology* (Roma 2006), BAR International Series 1568, Oxford, Archaeopress.

CAMPANA S., FRANCOVICH R. 2003, *Landscape archaeology in Tuscany: Cultural resource management, remotely sensed techniques, GIS based data integration and interpretation*, in *The Reconstruction of Archaeological Landscapes through Digital Technologies* (Boston, Massachusetts 2001), BAR International Series 1151, Oxford, Archaeopress, 15-28.

CAMPANA S., FRANCOVICH R. 2005, *Linking remote sensing and infra-site analysis to the reconstruction of rural settlement and landscape patterns*, in *The Reconstruction of Archaeological Landscapes through Digital Technologies* (Roma 2003), BAR International Series 1379, Oxford, Archaeopress, 61-73.

CAMPANA S., PIRO S., FELICI C., GHISLENI M. 2006, *From space to place: The Aiali project (Tuscany-Italy)*, in CAMPANA, FORTE 2006, 131-136.

CAPRIOLI M., TARANTINO E. 2005, *Metodi di elaborazione geometrica dei dati satellitari Quick-Bird*, «Bollettino SIFET», 2, 45-51.

CARROZZO M.T., LEUCCI G., MARGIOTTA S., NEGRI S., NUZZO L., RICCHETTI E. 2002, *Indagini geofisiche nel sito archeologico di Hierapolis (Turchia) ed integrazione con immagini da satellite ad alta risoluzione*, in *Atti del XXI Convegno GNGTS (Roma 2002)*, CD-ROM.

CARTER J.C. 1983, *The Territory of Metaponto, 1981-82*, Austin, Institute of Classical Archaeology.

CARTER J.C. 1990, *Between the Bradano and Basento: Archaeology of an ancient landscape*, in W. KELSO, R. MOST (eds.), *Earth Patterns. Essays in Landscape Archaeology*, Charlottesville, University of Virginia Press, 227-243.

CERAUDO G. 2003, *Fotografia aerea: tecniche, applicazioni e fotointerpretazione*, in GUAITOLI 2003, 75-85.

CHENG P., TOUTIN T. 2002, *QuickBird. A milestone for high-resolution mapping*, «Earth Observation Magazine», 11, 4, 14-18.

CIMINALE M., RICCHETTI E. 1999, *Non destructive exploration in the archaeological Park of Metaponto (Southern Italy)*, «Archaeological Prospection», 6, 75-84.

CLARK C.D., GARROD S.M., PARKER PEARSON M. 1998, *Landscape archaeology and remote sensing in southern Madagascar*, «International Journal of Remote Sensing», 19, 8, 1461-1477.

COLOSI F., FANGI G., GABRIELLI R., ORAZI R., PELOSO D. 2006, *Operative action for the conservation of the archaeological complex of Chan Chan, Perù*, in CAMPANA, FORTE 2006, 439-445.

CRESPI M., BAIOCCHI V., DE VENDICTIS L., LORENZONI F. 2003, *Impiego cartografico di immagini satellitari ad alta risoluzione. Le problematiche metriche: dati primari, metodologie, sperimentazioni*, in *La cartografia per il controllo e la gestione del territorio. Atti del Convegno (Lamezia Terme 2003)*, CD-ROM.

CRIST E.P., CICONE R.C. 1984, *A physically-based transformation of Thematic Mapper Data – The TM Tasseled Cap*, «IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing», 22, 3, 256-263.

D'ANDRIA F. 2005a, *Hierapolis antik kenti 2003 yılı kazı ve onarım çalışmaları*, in 26. Kazi Sonuçları Toplantısı, 2.Cilt, Ankara, 147-156.

D'ANDRIA F. 2005b, *Hierapolis di Frigia – Pamukkale*, in *Dall'Eufrate al Mediterraneo. Ricerche delle Missioni Archeologiche Italiane in Turchia*, Ankara, Istituto Italiano di Cultura, 93-104.

D'ANDRIA F. 2005-2006, *Introduzione, in L'iscrizione dipinta con la Preghiera di Manasse a Hierapolis di Frigia (Turchia)*, «Rendiconti della Pontificia Accademia di Archeologia», 78, 349-361.

D'ANDRIA F. 2006a, *Hierapolis 2004 yılı kazı ve araştırma çalışmaları*, in 27. Kazi Sonuçları Toplantısı, 2.Cilt, Ankara, 229-240.

D'ANDRIA F. 2006b, *Hierapolis of Phrygia*, in W. RADT (ed.), *Stadtgrabungen und Stadtforschung im westlichen Kleinasiens, «Byzas»*, 3, 113-124.

D'ANDRIA F. 2007, *Le attività della MAIER – Missione Archeologica Italiana a Hierapolis: 2000-2003*, in D'ANDRIA, CAGGIA 2007, 1-45.

D'ANDRIA F., CAGGIA M.P. (eds.) 2007, *Hierapolis di Frigia, I. Le attività delle campagne di scavo e restauro 2000-2003*, Istanbul, Ege Yayınları.

DEROIN J.-P. et al. 2006, *Archaeological remote sensing in Yemen, the Jabali test site. From large-scale survey to field investigation*, in CAMPANA, FORTE 2006, 7-12.

DE SIENA A. 1999, *Metaponto: l'evoluzione del centro urbano*, in *Archeologia della Basilicata*, Bari, Laterza, 247-294.

DE SIENA A. 2003, *Metaponto*, in GUAITOLI 2003, 360-365.

DI GIACOMO G. 2007, *Le immagini anaglifiche*, «Archeologia Aerea. Studi di Aerotopografia Archeologica», 2, 285-291.

DI GIACOMO G., SCARDOZZI G. 2007, *Visualizzazioni in tre dimensioni mediante anaglifi delle immagini satellitari ad alta risoluzione di Hierapolis*, «Archeologia Aerea. Studi di Aerotopografia Archeologica», 2, 292-296.

DRAKE N.A. 1997, *Recent aeolian origin of superficial gypsum crusts in Southern Tunisia: geomorphological, archaeological and remote sensing evidence*, «Earth Surface Processes and Landforms», 22, 641-656.

FAINTICH M. (ed.) 2004, *From Caesaramagus to Verulamium: Finding Previously Unknown Roman Roads* (<http://www.symbolicmessengers.com/archaeology.htm>).

GABELLONE F., SCARDOZZI G. 2006, *Integrated technologies for the reconstructive study of Mesopotamian cultural heritage: The cases of Ur, Uruk and Nimrud*, in *Proceedings of International Congress "Cultural Heritage and New Technologies" (Wien 2006)*, "Archäologie und Computer", Workshop 11, CD-ROM.

GABELLONE F., SCARDOZZI G. 2007, *From the object to the territory: Image-based technologies and remote sensing for the reconstruction of ancient contexts*, in P. MOSCATI (ed.), *Virtual Museums and Archaeology. The Contribution of the Italian National Research Council*, "Archeologia e Calcolatori", Supplemento 1, 123-142.

GEORGOUA O., KAIMARIS D., TSAKIRI M., PATIAS P. 2004, *From the aerial photo to high resolution satellite image. Tools for the archaeological research*, in *XX ISPRS Congress Proceedings "Geo-Imagery Bridging Continents" (Istanbul 2004)*, XXXV, part B7, ThS20 (www.isprs.org/istanbul2004/comm7/papers/202.pdf).

GITELSON A., MERZLYAK M. 1998, *Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves*, «Advances in Space Research», 22, 5, 689-692.

GOMARASCA A. 2003, *L'interpretazione delle immagini telerilevate*, «Bollettino SIFET», 3, 93-108.

GAITOLI M. 2001, *I sistemi informativi territoriali in rapporto al patrimonio archeologico*, in *Problemi della "Chora" coloniale dall'Occidente al Mar Nero. Atti del XL Convegno di studi sulla Magna Grecia (Taranto 2000)*, Taranto, Arte Tipografica, 385-402.

GAITOLI M. (ed.) 2003, *Lo sguardo di Icaro. Le collezioni dell'Aerofototeca Nazionale per la conoscenza del territorio*, Roma, Campisano Editore.

HORNE J. 2003, *A tasseled cap transformation for Ikonos images*, in *ASPRS 2003 Annual Conference and Proceedings*, Anchorage, 34-43.

HUILLARD-BRÈHOLLES J.-L.-A. 1857, *Historia Diplomatica Friderici Secundi sive constitutiones, privilegia, mandata, instrumenta quae supersunt istius imperatoris et filiorum eius*, Paris (ristampa 1995).

JANORA M. 1987, *Memorie storiche, critiche e diplomatiche della città di Montepeloso (oggi Irsina)*, Matera.

JORDAN C.F. 1969, *Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor*, «Ecology», 50, 663-666.

KAUTH R.J., THOMAS G.S. 1976, *The tasseled cap. A graphical description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat*, in *Proceedings from Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette, 41-51.

LASAPONARA R., MASINI N. 2005, *QuickBird-based analysis for the spatial characterization of archaeological sites: Case study of the Monte Serico Medieval village*, «Geophysical Research Letter», 32, 12, L12313.

LASAPONARA R., MASINI N. 2006a, *On the potential of QuickBird data for archaeological prospection*, «International Journal of Remote Sensing», 27, 16, 3607-3614.

LASAPONARA R., MASINI N. 2006b, *Identification of archaeological buried remains based on Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from QuickBird satellite data*, «IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters», 3, 3, 325-328.

LASAPONARA R., MASINI N. 2006c, *Archaeological prospection based on satellite QuickBird imagery*, in *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology VI*, vol. 6366 (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2006SPIE.6366E..26L>).

LASAPONARA R., MASINI N. 2006d, *Performance evaluation of data fusion algorithms for detection of archaeological features by using satellite QuickBird data*, in *CAMPANA, FORTE 2006*, 13-20.

LASAPONARA R., MASINI N. 2007, *Detection of archaeological crop marks by using satellite QuickBird multispectral imagery*, «Journal of Archaeological Science», 34, 214-221.

LASAPONARA R., LANORTE A., POTENZA M.R., MASINI N. 2006, *VHR satellite images for the knowledge and the enhancement of cultural landscapes: The medieval deserted villages in Basilicata (Southern Italy)*, in *Proceedings of the International Conference on Heritage, Weathering and Conservation* (Madrid 2006), II, 841-846.

LEUCCI G., NEGRI S., RICCHETTI E. 2002, *Integration of high resolution optical satellite imagery and geophysical survey for archaeological prospection in Hierapolis (Turkey)*, in *Proceedings International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IEEE GARSS)*, «IEEE International», 14, 1991-1993.

LÖNNQVIST M., TÖRMÄ M. 2003, SYGIS. *The Finnish Archaeological Project in Syria*, in *CIPA 2003. XIX International Symposium. New Perspectives to Save Cultural Heritage (Antalya 2003)*, «The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 34, part 5/C15, Istanbul, 609-614.

LÖNNQVIST M., TÖRMÄ M. 2004, *Different implications of a spatial boundary. Jebel Bishri between the desert and sown in Syria*, in *ISPRS XX Congress Proceedings (Istanbul 2004)*, «The ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 35, part B.1, Istanbul, 897-902.

MASINI N. 1995, *Note storico-topografiche e fotointerpretazione aerea per la ricostruzione della "forma urbis" del sito medievale di Monte Serico*, «Tarsia», 16, 45-64.

MASINI N., LASAPONARA R. 2006a, *Satellite-based recognition of landscape archaeological features related to ancient human transformation*, «Journal of Geophysics and Engineering», 3, 230-235.

MASINI N., LASAPONARA R. 2006b, *Evaluation of the spectral capability of QuickBird imagery for the detection of archaeological buried remains*, in *CAMPANA, FORTE 2006*, 21-29.

MASINI N., LASAPONARA R. 2007, *Investigating the spectral capability of QuickBird data to detect archaeological remains buried under vegetated and not vegetated areas*, «Journal of Cultural Heritage», 8, 1, 53-60.

MAZZEI M. 2003, *Metodi di georeferenziazione speditiva e di precisione, ortofotopiani*, in *GUAITOLI 2003*, 100-101.

MUSSON C., PALMER R., CAMPANA S. (eds.) 2005, *In volo nel passato. Aerotopografia e cartografia archeologica*, Firenze, All'Insegna del Giglio.

PICCARRETA F., CERAUDO G. 2000, *Manuale di aerofotografia archeologica. Metodologia, tecniche e applicazioni*, Bari, Edipuglia.

RICCHETTI E. 2004, *Application of optical high resolution satellite imagery for archaeological prospection over Hierapolis (Turkey)*, in *Proceedings International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, «IEEE International», 6, 3898-3901.

RICHARDS J.A. 1986, *Remote Sensing Digital Image Analysis. An introduction*, New York, Springer Verlag.

ROUBIS D., SOGLIANI F., LAZZARI M. 2003, *Ricerche archeologiche a Jure Vetere (S. Giovanni in Fiore). La campagna di scavo del 2002 e le indagini geopedologiche*, «Siris. Studi e Ricerche della Scuola di Specializzazione in Archeologia di Matera», 4, 99-118.

ROUSE J.W., HAAS R.H., SCHELL J.A., DEERING D.W. 1973, *Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS*, in *Third ERTS Symposium*, NASA, SP-351, I, 309-317.

SCARDOZZI G. 2004, *Il contributo delle riprese satellitari e aeree alla conoscenza dell'urbanistica di Hierapolis di Frigia*, «Archeologia Aerea. Studi di Aerotopografia Archeologica», 1, 235-247.

SCARDOZZI G. 2007a, *Ricerche topografiche e telerilevamento*, in D'ANDRIA, CAGGIA 2007, 67-86.

SCARDOZZI G. 2007b, *L'urbanistica di Hierapolis di Frigia: ricerche topografiche, immagini satellitari e fotografie aeree*, «Archeologia Aerea. Studi di Aerotopografia Archeologica», 2, 83-134.

SCARDOZZI G. c.s.a, *Riconoscimenti archeologiche nell'area urbana e nel territorio di Hierapolis, in Hierapolis di Frigia, II. Le attività delle campagne di scavo e restauro 2004-2006*, Istanbul, Ege Yayınlari (in corso di stampa).

SCARDOZZI G. c.s.b, *Un nuovo miliario dal territorio di Hierapolis di Frigia. Contributo alla ricostruzione della viabilità antica nella valle del Lykos*, in *Hierapolis di Frigia, II. Le attività delle campagne di scavo e restauro 2004-2006*, Istanbul, Ege Yayınlari (in corso di stampa).

SEMERARO G., PECERE B. 2007, *Il sistema per la gestione dei dati di scavo*, in D'ANDRIA, CAGGIA 2007, 121-140.

SEVER T.L. 1998, *Validating prehistoric and current social phenomena upon the landscape of Petén, Guatemala*, in D. LIVERMAN, E.F. MORAN, R.R. RINFUSS, P.C. STERN (eds.), *People and Pixels: Linking Remote Sensing and Social Science*, Washington, National Academy Press, 145-163.

SHEETS P., SEVER T. 1988, *High tech wizardry*, «Archaeology», 41, 6, 28-35.

SMALL A. 1976, *The Iron age and Roman site of Monte Irsi*, in *Canadian Archaeology Abroad*, Calgary, 23-33.

SMALL A., SMALL C., CAMPBELL I., MACKINNON M., PROWSE T., SIPE C. 1998, *Field survey in the Basentello valley on the Basilicata-Puglia border*, «Echos du Monde Classique. Classical Views», 42, 337-371.

STARK S. (ed.) 2005, *Archaeological Prospections in the Aktangi Valley System (Northern Tadzhikistan) in 2005* (<http://www.orientarch.uni-halle.de/sfb586/c5/2005/index.htm>).

SPANÒ A. 2002, *Le ragioni dell'intervento di natura topografica a Hierapolis*, in D. DE BERNARDI FERRERO (eds.), *Saggi in onore di Paolo Verzone*, Roma, L'Erma di Bretschneider, 233-261.

SPANÒ A. 2007, *Rilievo metrico, cartografia numerica e GIS*, in D'ANDRIA, CAGGIA 2007, 87-120.

TUCKER C.J. 1979, *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*, «Remote Sensing of Environment», 8, 127-150.

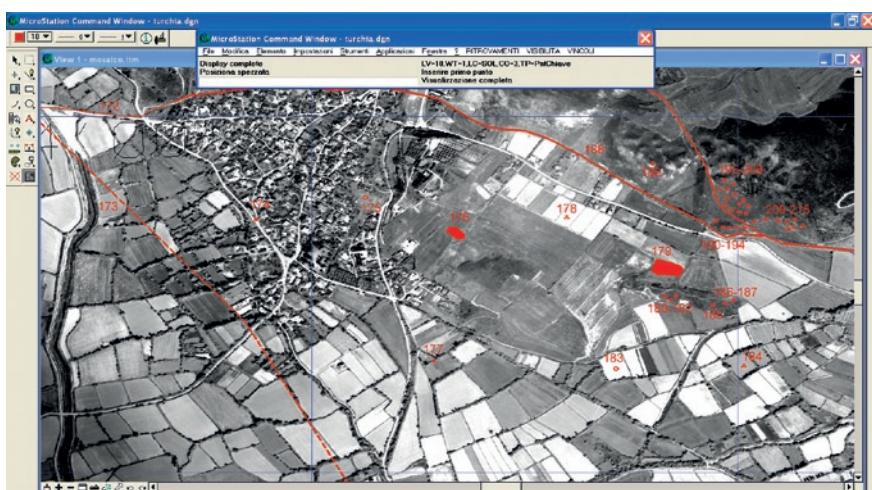
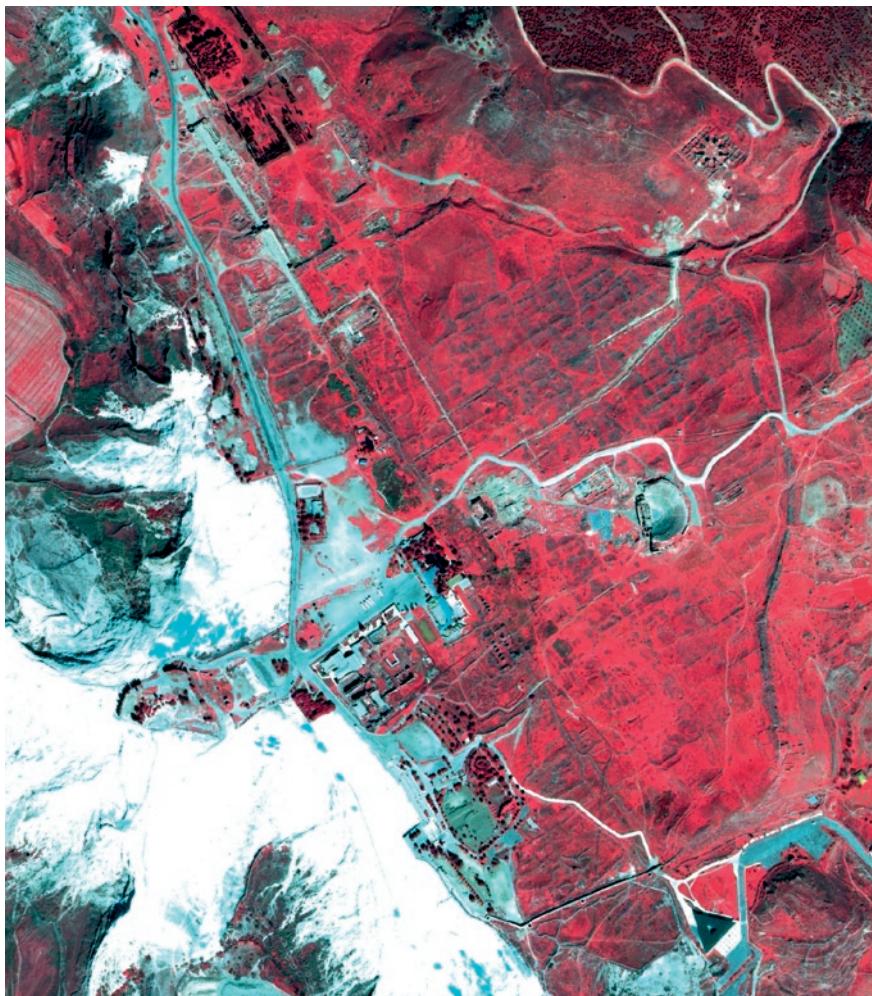
UR J.A. 2006, *Google Earth and Archaeology*, «The SAA Archaeological Record», 6, 3, 35-38.

YARBROUGH L., EASSON G., KUSZMAUL J. 2005, *Tasseled cap coefficients for the QuickBird 2 sensor: multiple derivation techniques and comparisons*, in *Proceedings of Pecora 16: Global Priorities in Land Remote Sensing (Sioux Falls 2005)*, CD-ROM.

ZHANG Y. 2004, *Understanding image fusion*, «Photogrammetric Engineering & Remote Sensing», 70, 657-661.

ABSTRACT

The paper concerns the research activities of the IBAM-CNR and the IMAA-CNR in the field of archaeological remote sensing with the use of very high resolution images of QuickBird, the satellite with the greatest geometrical resolution available for civil use. These images have an enormous potential in the study of ancient urban and territorial contexts and for the identification and spatial characterization of archaeological sites, particularly when aerial photos and recent detailed maps are not available. During the archaeological research in Hierapolis of Phrygia (Turkey) and in southern Italy (Monte Irsi, Monte Serico, Jure Vetere and Metaponto), the examination and the study of panchromatic and multispectral images of QuickBird made it possible to detect surface anomalies and traces linked to ancient buried structures or to paleo-environmental elements; moreover, panchromatic images were georeferenced and used as the base field maps for the survey in Hierapolis, together with GPS systems. The satellite images were analysed both for the identification of archaeological features and for the characterisation of the contexts in which these elements were found. During field work, the traces and the anomalies identified in the images were constantly verified, so as to determine their actual relevance to archaeological elements, to interpret them and, where possible, to specify their chronology, thus avoiding misunderstandings and errors. The images were used in all phases of the research (field work, documentation, data processing and management in GIS environment), in combination with the aerial photographs and the available maps; they were also used for presentation of the results and were draped on DEM for the 3D visualization of the territories and of the archaeological features. In order to highlight particular archaeological traces and anomalies some image processing methodologies were adopted: multispectral processing and algorithms of data fusion (with the integration of the high spatial resolution of panchromatic images with the spectral capability of multispectral images), of enhancement (such as PCA, NDVI and TCT) and edge detection.



Tav. V – a: Hierapolis di Frigia (2005): immagine satellitare *pan-sharpened* (metodo Gram-Schmidt) con elaborazione *colour normalized RGB* (bande 4-3-2); la banda vicino infrarosso evidenzia le tracce dell'impianto urbano riferibili ad un'anomala crescita della vegetazione.

b: Hierapolis di Frigia: utilizzo delle immagini satellitari come una delle basi per la carta archeologica del territorio (software: moduli di MicroStation SE della Intergraph); in rosso sono rappresentate le evidenze archeologiche riscontrate durante la ricognizione diretta del terreno.